



**Universidade de  
Aveiro**  
Ano de 2017

Departamento de Engenharia de Materiais e  
Cerâmica

**Tiago José Fontoura  
Ribeiro**

**ACOPLAMENTO DE ATUADORES  
ELETROMECAÂNICOS A VÁLVULAS DE  
ESQUENTADORES**

CONFIDENTIAL



**Tiago José Fontoura  
Ribeiro**

**ACOPLAMENTO DE ATUADORES  
ELETROMECAÂNICOS A VÁLVULAS DE  
ESQUENTADORES**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria Elizabete Costa, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e sob a co-orientação científica da Doutora Paula Maria Vilarinho, Professora Associada do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro e sob a orientação técnica dos Engenheiros Ricardo Carranca e Jorge Pinho da BOSCH Termoelectrica (Aveiro).

### **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão que sempre me apoiaram e acompanharam no meu crescimento como estudante e pessoa, e à minha namorada Eliana Ribeiro por todo o apoio, paciência e incentivo ao longo desta caminhada.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Jorge Ribeiro Frade**

professor catedrático do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Luis Cadillon**

professor associado com agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Maria Elizabete Jorge Vieira da Costa**

professora auxiliar do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Ao Engenheiro Sérgio Salustio pela proposta apresentada e por nos dar a oportunidade de participarmos num projeto com estes contornos.

À professora Doutora Maria Elisabete Jorge Vieira Costa e à professora Doutora Paula Maria Lousada Silveirinha Vilarinho do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro pela orientação, incansável disponibilidade e empenho na realização de todo este trabalho.

Ao professor Angus Kingon da Universidade de Brown dos EUA pela sua disponibilidade, empenho e partilha de conhecimentos.

Ao Prof. Pim Groen da Delft University of Technology da Holanda pela disponibilidade e partilha de conhecimentos

À Doutora Alexandra Gonçalves da Bosch Termotecnologia pelo seu empenho na gestão e organização dos trabalhos.

Ao Engenheiro Ricardo Laranjeira da Bosch Termotecnologia por todo o empenho e apoio prestado na realização dos trabalhos.

Ao Engenheiro Ricardo Carranca e ao Doutor Jorge Pinho da Bosch Termotecnologia pela sua dedicação, liderança e organização dos trabalhos.

À Engenheira Célia Miranda e Sr. Jacinto Alves do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro por todo o apoio laboratorial prestado.

Ao Mestre Pedro Duarte e a todos os membros integrantes do grupo de Electrocerâmicos do CICECO - Aveiro Materials Institute e do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro pelo apoio prestado.

Aos meus pais e irmão por todo o apoio e incentivo dado.

E por fim, quero agradecer à minha namorada Eliana Ribeiro por me apoiar incondicionalmente. Sem ela, este trabalho não se teria realizado.

**palavras-chave** Válvula, válvula de esquentador, válvula piezoelétrica, válvula de solenoide, macroválvula, microválvula, atuador piezoelétrico, atuador bender, atuador disco

## **resumo**

Os esquentadores produzidos atualmente pela Bosch Termotecnologia utilizam válvulas baseadas em atuadores de solenóide para a regulação do fluxo de combustível. Cada atuador é caracterizado por parâmetros que garantem o correto funcionamento dos dispositivos, designadamente no que se refere a caudais de gás e quedas de pressão através das válvulas.

Recentemente a Bosch Termotecnologia manifestou o interesse em explorar a viabilidade de substituir os atuadores solenóide por atuadores piezoelétricos. O seu possível interesse reside na necessidade de substituir a matéria-prima principal do solenóide, o cobre, devido ao seu preço e sua variabilidade, dependência dos mercados orientais, como a China, e instabilidade da pureza da composição química do Cu, que origina flutuações no desempenho do solenóide.

No presente projeto propõem-se soluções baseadas em atuadores piezoelétricos, para dois tipos de válvulas em uso nos esquentadores da Bosch, a macroválvula e a microválvula. Estas válvulas últimas são caracterizadas por apresentarem um deslocamento do atuador de 1mm e uma diferença de potencial de 1.6V.

É sabido que os atuadores à base de materiais piezoelétricos apresentam deslocamentos pequenos, mas de elevada precisão. A necessidade de deslocamentos elevados supera-se por acoplamento de soluções de amplificação. Por outro lado permitem variação do deslocamento por variação da tensão aplicada.

Para a macroválvula propõe-se uma solução baseada num atuador piezoelétrico bimorfo em forma de disco e para a microválvula um atuador piezoelétrico bimorfo do tipo *bender*. A solução proposta para a microválvula é aqui aprofundada, sendo abordados dois *benders* de diferentes dimensões. Caracterizam-se os desempenhos piezoelétricos dos *benders* em termos das suas respostas a variações de tensão, i.e. curvas de deslocamento em função do campo elétrico e respetivo comportamento histerético.

## resumo

Com o intuito de avaliar o impacto do funcionamento do atuador nas atuais condições de escoamento do gás, desenhou-se e construiu-se um protótipo de uma microválvula por manufatura aditiva usando o termoplástico acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) e incorporou-se nele o *bender* de menores dimensões. A caracterização do desempenho deste protótipo através das relações observadas entre tensões elétricas aplicadas, deslocamentos do *bender*, quedas de pressão do gás na sua passagem pela microválvula e caudais associados, permitiu identificar condições de operação do atuador piezoelétrico semelhantes às da microválvula com atuador solenóide. Observou-se que ativações do atuador piezoelétrico bimorfo do tipo *bender* com tensões aplicadas próximas de 35 V asseguram quedas de pressão (e caudais) semelhantes aos observados na microválvula com atuador solenóide.

A otimização da implementação da atuação piezoelétrica em válvulas da Bosch Termotecnologia, nomeadamente a nível das tensões elétricas e custo, poderá passar pelo redimensionamento de algumas das válvulas.

Em conclusão, foi demonstrada a viabilidade técnica de substituição de um atuador solenóide por um atuador piezoelétrico tipo *bender* bimorfo numas das atuais microválvulas da Bosch Termotecnologia, sem recurso a um novo desenho da microválvula.

**keywords**

Valve, heater valve, piezoelectric valve, solenoid valve, macrovalve, microvalve, piezoelectric valve, bender actuator, disc actuator

**abstract**

The heaters currently produced by Bosch Thermotechnology rely on valves based on solenoid actuators for regulating the fuel flow.

Each actuator is characterized by parameters that ensure the correct functioning of the devices, namely with regard to gas flows and pressure drops through the valves.

Bosch Thermotechnology has recently expressed an interest in exploring the feasibility of replacing solenoid actuators with piezoelectric actuators.

Its possible interest lies in the need to replace the main raw material of the solenoid, copper, due to its price and variability, dependence on the eastern markets, such as China, and instability of the chemical composition of Cu, which causes fluctuations in the solenoid performance.

In the present project we propose solutions based on piezoelectric actuators, for two types of valves in use in Bosch water heaters, the macrovalve and the microvalve. These valves are characterised by XXX

For the macrovalve a solution based on a disc type bimorphic piezoelectric actuator is proposed and for the microvalve a bender type bimorph piezoelectric actuator.

The proposed solution for the microvalve is detailed here, and two benders of different dimensions are considered. The piezoelectric performances of the benders are characterized in terms of their responses to voltage variations, i.e. displacement curves as a function of the electric field and respective hysteretic behavior. In order to evaluate the impact of the actuator operation on gas flow conditions, a prototype of a microvalve was designed and constructed by additive manufacturing using acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) thermoplastic and the small bender was coupled to the prototype.



## **abstract**

The characterization of the performance of this prototype through the observed relations between applied voltages, bender displacements, gas pressure drops through the microvalve and associated flow rates allowed to identify conditions of operation of the piezoelectric actuator similar to those of the solenoid actuator microvalve. It has been observed that activations of the bimorph piezoelectric actuator of the bender type with applied voltages close to 35 V ensure pressure drops (and flow rates) similar to those observed in the micro-valve with solenoid actuator.

The optimization of the implementation of the piezoelectric actuation in valves of Bosch Thermotechnology, namely in relation to the electrical voltages and cost, may pass through resizing / redesigning some of the valves.

In conclusion, the technical feasibility of replacing a solenoid actuator with a bimorph bender piezoelectric actuator was demonstrated in one of Bosch Thermotechnology's current micro-valves, without resorting to a new design of the microvalve.



## Índice de figuras

Figura 1 - Exemplo de uma válvula de solenoide de regulação do fluxo de gás, de atuação direta <sup>1</sup> . .....	9
Figura 2 - Linhas de campo magnético de um solenoide com espiras espaçadas <sup>3</sup> . .....	10
Figura 3 – Linhas de campo magnético de um solenoide de comprimento finito, percorrido por uma corrente constante, quando as suas espiras se encontram muito próximas <sup>2</sup> . .....	10
Figura 4 - a) representação esquemática de um êmbolo magnético e respetivos polos; b) representação do modelo de carga equivalente a do êmbolo e a sua correspondente magnetização <sup>4</sup> . .....	12
Figura 5 - Referencial de variáveis geométricas que relaciona as posições do êmbolo e do solenoide <sup>4</sup> . .....	13
Figura 6 - Comportamento típico da força magnética entre o êmbolo e o solenoide, com a variação de z. Os valores da figura foram obtidos para uma corrente de atuação de 11 A; com um solenoide de 8mm de altura, com raio interno de 4,5 mm e com 105 espiras; o êmbolo tinha de raio 1 mm, 10 mm de comprimento e uma magnetização de $10^6$ A/m <sup>4</sup> . .....	14
Figura 7 - Representação esquemática de uma válvula de solenoide e a representação o referencial da função $x(t)$ <sup>5</sup> . .....	15
Figura 8 – Corrente de excitação característica de um solenoide <sup>5</sup> . .....	16
Figura 9 – Válvula com atuação através de solenoide em configuração de 2 vias (2-way) (Ref. ASCO Series 238) <sup>6</sup> . .....	17
Figura 10 - Válvula com atuação através de solenoide em configuração de 2 vias (2-way) (ref. ASCO Series 320) <sup>7</sup> . .....	18
Figura 11 - Válvula com atuação através de solenoide em configuração de 4 vias (4-way) (Ref. ASCO Series 238) <sup>6</sup> . .....	18
Figura 12 – Válvula de solenoide de operação piloto. Na situação A) o atuador é pressurizado pelo fluido armazenado na primeira camara e obstrui a passagem de gás. Em B) é aberta uma válvula que alivia a pressão na referida camara e o atuador sobe. Dessa forma permite a passagem do fluido <sup>8</sup> . .....	19
Figura 13 - Representação esquemática do dispositivo de ignição direta. ....	21

Figura 14 - Representação esquemática da válvula de solenoide (macroválvula) presente no dispositivo de ignição direta. Neste esquema destaca-se diâmetro da conduta de admissão do gás ( $D_0$ ), diâmetro do orifício de passagem do gás ( $D_1$ ) e diâmetro do selante ou extremidade do êmbolo ( $D_2$ ).....	22
Figura 15 - Representação esquemática do dispositivo de ignição piloto DV2 <sup>9</sup> , ilustrando a microválvula normalmente fechada A), a microválvula normalmente aberta B), a câmara de armazenamento de gás C) e o êmbolo atuador D). ....	23
Figura 16 - Imagem de uma microválvula normalmente fechada utilizada pela Bosch no seu dispositivo DV2. Nesta imagem está evidenciado: A) as placas ferrosas, B) o atuador e C) a passagem de gás.....	25
Figura 17 – Princípio de funcionamento do dispositivo de ignição piloto DV2 <sup>9</sup> . A) a microválvula normalmente aberta não está ativa e a normalmente fechada está energizada. B) ambas as microválvulas estão no seu estado de repouso.....	26
Figura 18 – Variação do coeficiente de descarga com o $Re$ para uma placa com orifício <sup>10</sup> . ....	28
Figura 19 – Representação esquemática da ocorrência de polarização por ação de um campo elétrico: a) os domínios polares encontram-se aleatoriamente orientados; b) observa-se a orientação dos domínios numa determinada direção sob a ação de um campo elétrico de que resulta a polarização do material <sup>13</sup> . ....	30
Figura 20 – Representação esquemática de fronteiras de domínios a) 90° e b) 180°. As setas indicam a polarização no interior do domínio <sup>14</sup> . ....	31
Figura 21 - Curva de polarização em função do campo elétrico aplicado na direção [111], medida numa amostra de um filme sol-gel de $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.55})O_3$ , com 1.3 $\mu m$ de espessura <sup>11</sup> . ....	32
Figura 22 - Classificação dos materiais com base nos grupos pontuais de simetria, adaptado de <sup>16</sup> . ....	34
Figura 23 - Diagrama de fases do sistema binário $PbZrO_3 - PbTiO_3$ e identificação da região morfotrópica <sup>17</sup> . ....	35
Figura 24 - Esquematização dos efeitos piezoelétricos direto e inverso <sup>16</sup> . ....	39

Figura 25 - Representação esquemática do efeito piezoelétrico inverso em modo 33 a) e em 31 b) <sup>13</sup> .....	41
Figura 26 - Representação esquemática do deslocamento $\Delta x$ de um stack piezoelétrico com comprimento $x$ . ....	43
Figura 27 - Diagrama de força e deslocamento de um atuador piezoelétrico com determinadas dimensões <sup>29</sup> .....	44
Figura 28 - Modo de atuação de um atuador bender bimorfo <sup>30</sup> . ....	46
Figura 29 - Representação esquemática de um stack piezoelétrico <sup>30</sup> .....	48
Figura 30 - Amplificação de movimento de uma só alavanca <sup>28</sup> . ....	49
Figura 31 - Sistemas de amplificação de movimento de alavancas: a) simples e b) duplo <sup>31</sup> .....	50
Figura 32 - Sistema simétrico de amplificação mecânica de 5 alavancas <sup>31</sup> . ....	50
Figura 33 - Dimensões associadas a um sistema simétrico de amplificação mecânica de 5 alavancas <sup>31</sup> .....	51
Figura 34 - Válvula com um atuador piezoelétrico do tipo bender <sup>32</sup> .....	52
Figura 35 - Suporte da macroválvula, evidenciando os orifícios de entra e saída de gás com diâmetros $D_0$ e $D_1$ respectivamente e a sede (com diâmetro 2,75mm) da atual macroválvula utilizada pela BOSCH.....	56
Figura 36 - Esquema representativo de um atuador em configuração de disco <sup>21</sup> .....	56
Figura 37 – Bender a incorporar na microválvula, bender 1. ....	58
Figura 38 – Dimensões atuais das microválvulas normalmente fechadas (na imagem não está presente o atuador). Os valores das distâncias assinaladas na figura estão expressos em cm. O orifício de passagem gás encontra-se também legendado A). .....	59
Figura 39 – Curvas de histerese de um atuador de circuito aberto a diferentes picos de tensão <sup>34</sup> .....	60
Figura 40 – Aumento do deslocamento do atuador piezoelétrico em circuito aberto após um deslocamento de 60 $\mu\text{m}$ em função do tempo <sup>35</sup> . ....	61
Figura 41 – Drift do deslocamento de um atuador piezoelétrico <sup>34</sup> . ....	62

Figura 42 - Esquema representativo do posicionamento das tomas de pressão no dispositivo DV2.....	66
Figura 43 - Diagrama de pressões associadas à montagem experimental da figura 42. .	67
Figura 44 – Apparatus experimental desenvolvido no curso deste trabalho e utilizado para a medição da queda de pressão associada à microválvula solenóide normalmente fechada. ....	68
Figura 45 - Representações esquemáticas das áreas $A_1$ e $A_s$ . As fórmulas dessas mesmas áreas estão descritas nas equações 22 e 23 (presentes na figura). ....	70
Figura 46 - Bender bimorfo. Pode ser observado o seu deslocamento $\Delta L_{bend}$ , a direção da sua polarização $P$ e do campo elétrico $E$ a que é sujeito. Este bender possui 3 elétrodos ligados a um terminal positivo $+V_F$ , a um negativo $-V_F$ e um variável $V^{21}$ . ....	72
Figura 47 – A) Apparatus experimental baseado no LVDT de um dilatômetro, utilizado na medição dos deslocamentos dos benders e B) Zona de contacto do bender com a vareta do LVDT.....	73
Figura 48 – Representação esquemática da técnica de adição manufaturada polyjet <sup>37</sup> .	75
Figura 49 - Esquema da montagem experimental utilizada para teste de desempenho do protótipo de microválvula piezoelétrica (A) desenvolvido neste trabalho. Estes testes incluíram a quantificação da queda de pressão associada à atuação do bender incorporado no protótipo da microválvula piezoelétrica. $P'_1$ e $P'_2$ quantificam a queda de pressão referida.....	76
Figura 50 – A) Parte superior do protótipo para simulação dos testes escoamento e B) parte inferior do protótipo para simulação dos testes de escoamento [desenhos concebido em SolidWorks 2017 - 2018]. O orifício de entrada de ar tem 6.9 mm de diâmetro e o orifício de saída de ar tem 1mm de diâmetro. ....	80
Figura 51 – Protótipo de válvula impresso em ABS: A) parte superior; B) parte inferior. A figura ilustra também a localização do bender. ....	80
Figura 52 - Protótipo de válvula impresso com o bender acoplado: A) alinhamento do bender; B) fixação do bender e colocação de vedante; C) protótipo finalizado. ....	81

Figura 53 - Tempo de escoamento total do ar da microválvula de solenoide em função de $P_1$ inicial. A pressão varia entre 25 e 50 mbar <sub>1</sub> .	82
Figura 54 – Resposta do bender 1 a diferentes pulsos de tensão aplicada. O deslocamento do sensor varia entre 128 $\mu$ m e 272 $\mu$ m quando a amplitude do pulso varia entre 10 e 35V.	83
Figura 55 – Deslocamento de cada um dos benders em função do campo elétrico a que é sujeito.	84
Figura 56 - Curvas de histerese do bender 2: variação do deslocamento com o campo aplicado, usando como máximos de tensão aplicada em cada ciclo os valores de 20, 40 e 60V.	86
Figura 57 - Variação do deslocamento do bender 1 (expressa em percentagem do deslocamento inicial) em função do tempo de aplicação de uma diferença de potencial constante de 10, 30 e 60V.	87
Figura 58 - Variação do deslocamento do bender 2 (expressa em percentagem do deslocamento inicial) em função do tempo de aplicação de uma diferença de potencial constante de 10, 30 e 60V.	88
Figura 59 - Queda de pressão originada pelo orifício de saída de ar em função de $P_1$ . O atuador foi ativado com diferenças de potencial que variaram entre 10 e 60V.	90
Figura 60 - Variação do caudal de gás (ar) através do orifício da válvula em função da variação da queda de pressão através da válvula. A tensão aplicada ao bender variou entre os 10 e os 60V.	91
Figura 61 - Queda de pressão originada pelo orifício de saída de ar em função do caudal de ar que o atravessa. O bender foi ativo com uma diferença de potencial que variou entre 35 e 60V. É também apresentada a vermelho a queda de pressão originada pela microválvula de solenoide que se situa entre as quedas de pressão geradas pelo bender ativado a 35 e 40V.	92
Figura 62 - Queda de pressão originada pelo orifício de passagem de gás do modelo de simulação em função da diferença de potencial aplicada ao bender. O valor de $P_1$ foi mantido constante e igual a 50mbar.	94

Figura 63 - Variação do caudal com o deslocamento do atuador .....	94
Figura 64 - Vista do interior de um LVDT <sup>39</sup> evidenciando o seu núcleo e as bobines primárias e secundárias. ....	107
Figura 65 - Esquema de conexão elétrica do bender. A cada uma das ligações $U_+$ , $U_c$ e $U_c$ corresponde uma opção de ligação presente na tabela 3. ....	108
Figura 66 - Deslocamento do bender de menores dimensões em função do tempo de medição. ....	110
Figura 67 - Deslocamento do bender de maiores dimensões em função do tempo de medição. ....	110
Figura 68 - Deslocamentos do bender 2 em função do tempo de medição utilizados para representar a curva de histerese correspondente a uma diferença de potencial máxima aplicada de 20V. ....	111
Figura 69 - Deslocamentos do bender 2 em função do tempo de medição utilizados para representar a curva de histerese correspondente a uma diferença de potencial máxima aplicada de 40V. ....	112
Figura 70 - Deslocamentos do bender 2 em função do tempo de medição utilizados para representar a curva de histerese correspondente a uma diferença de potencial máxima aplicada de 60V. ....	113



## Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades elétricas à temperatura ambiente de piezoelétricos de perovskite à base de chumbo <sup>16</sup> (Adaptado).....	37
Tabela 2 - Propriedades de vários atuadores flexíveis <sup>29</sup> .....	47
Tabela 3 - Características dos atuadores com configuração bender. ....	58
Tabela 4 - Opções de configurações elétricas para os bender piezoelétrico .....	108

## Abreviaturas

A	Área	69
ABS	acrilonitrilo-butadieno-estireno	74
B	Campo magnético	11, 12
$C_D$	Coeficiente de descarga	27
D	Diâmetro	27
$D_i$	Vetor de deslocamento dielétrico	29
$\Delta P$	Queda de pressão	69
$\Delta x$	Deslocamento	45
$\delta_{ij}$	Simbolo de Kronecker	29
$\delta_{in}$	Input deslocamento piezoelétrico	50
$d_{ij}$	Coeficiente piezolétrico	38
$E_j$	Campo elétrico	29
$\epsilon_0$	Permitividade no vácuo	29
$\epsilon$	Permitividade dielétrica	29
$\epsilon_r$	Permitividade relativa	30
FC	Fail closed	23, 25, 26, 66-69, 71, 81
$F_{mag}$	Força magnética	13
FO	Fail Open	23, 25, 68, 81
g	Figura de mérito piezoelétrica	42
H	Intensidade do campo magnético	12
I	Corrente que percorre o solenóide	11
$K_{mola}$	Constante da mola	23
K	Fator de acoplamento	41
$K_T$	Rigidez	43
$K_{mola}$	Constante da mola	22
l	Comprimento do solenoide	11
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	72, 73, 83, 88, 107, 109

M	Magnetização	12
$\mu$	Viscosidade	27
$\mu_0$	Permeabilidade no vacuo	11
MPB	Morphotropic phase boundary	35
N	Número de espiras do solenoide	11
$P_i$	Vetor de polarização	29
$P_s$	Polarização espontânea	31
PZT	$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$	35
Q	Caudal	69
R	Resistência do solenóide	15
$R_{mag}$	Raio do êmbolo	13
Re	Número de Reynolds	27
t	Espessura	85
$T_c$	Temperatura de Curie	35
u	Velocidade	27
U	Diferença de potencial	15, 49
$\chi$	Susceptibilidade dielétrica	29
$\Psi$	Fluxo magnético	15
$\rho$	Densidade	27,69

CONFIDENTIAL

## Índice de conteúdos

Índice de figuras	i
Índice de tabelas	vii
Abreviaturas	viii
Índice de conteúdos	xi
1. Enquadramento	1
1.1. A necessidade: substituição das válvulas de solenoide	2
1.2. A proposta: válvulas piezoelétricas	3
1.3. Organização da tese	4
2. Estado da Arte	7
2.1. Válvulas de solenoide	8
2.1.1. Estrutura da válvula de solenoide e equações do seu comportamento	8
2.1.2. Tipologias de válvulas de solenoide e aplicações	17
2.1.3. Válvulas Bosch: macroválvulas e microválvulas e coeficientes de descarga das válvulas	20
2.2. Materiais piezoelétricos: conceitos	29
2.2.1. Polarização, estrutura cristalina e materiais piezoelétricos	29
2.2.2. Efeito piezoelétrico direto, inverso e coeficientes piezoelétricos	38
2.3. Válvulas com atuadores piezoelétricos	42
2.3.1. Atuadores unimorfos e bimorfos	45
2.3.2. Atuadores multicamada	48
2.3.3. Sistemas de amplificação mecânica	49
3. Propostas de soluções para válvulas piezoelétricas	54

3.1. Proposta de atuador para a macroválvula	55
2.2. Proposta de atuador para a microválvula	57
4. Ensaio Experimentais e Cálculos	64
4.1 Caracterização do escoamento na microválvula solenóide	65
4.2 Atuador para a microválvula normalmente fechada	71
4.3 Desenho e manufatura aditiva de protótipo para prova de conceito	74
5. Resultados	78
5.1. Desenho e manufatura aditiva de protótipo para prova de conceito	79
5.2. Escoamento do fluido na microválvula solenoide	81
5.2 Deslocamento do atuador piezoelétrico	83
5.3 Prova de conceito	89
5.3.1 Escoamento do fluido no protótipo da nova válvula	89
6. Conclusão	97
Referências bibliográficas	102
Anexo 1.	107
LVDT	107
Anexo 2.	108
Ligações elétricas dos benders	108
Anexo 3.	109
Deslocamentos piezoelétricos	109
Anexo 4.	111
Curvas de histerese	111

CONFIDENTIAL





**1.**

# **Enquadramento**

## Enquadramento

### 1.1. A necessidade: substituição das válvulas de solenoide

A Bosch é uma empresa alemã com diversas filiais em Portugal, maioritariamente localizadas na zona norte do país (região de Aveiro e de Braga). A Bosch Termotecnologia, situada em Cacia (Aveiro) ocupa-se do desenvolvimento e produção de sistemas de aquecimento e de água quente. Esta empresa apresenta uma larga e diversificada gama de produtos que vão desde caldeiras de chão e caldeiras murais até às bombas de calor. No entanto, uma grande parte da produção desta empresa está centrada no fabrico de esquentadores.

Para fazerem o controlo de fluxo de gás e de água, os esquentadores utilizam dois tipos de válvulas: as válvulas de ignição direta (controlam o fluxo do gás da água) e as de ignição piloto que apenas regulam o fluxo de gás. Estas últimas possuem na sua configuração duas microválvulas.

Dentro de cada uma destas categorias a empresa conta ainda com válvulas de segurança e válvulas modelantes. As válvulas de segurança apenas interditam ou permitem a passagem da totalidade do fluido e as modelantes fazem um controlo mais apertado do mesmo, ou seja, permitem a regulação de fluxos intermédios.

As válvulas de ignição piloto são utilizados em esquentadores atmosféricos como por exemplo o **Compact 2**. Este tipo de esquentadores são sistemas caracterizados pelo seu baixo consumo elétrico.

Em ambos os casos, as válvulas estão posicionadas na parte inferior do esquentador, junto à entrada de ar e de água.

Uma válvula de solenoide conta com um atuador que por ação de um campo magnético obstrui ou permite a passagem de um determinado fluido. O atuador mais comum é um embolo magnético que se encontra rodeado pelo referido solenoide. No entanto podem existir outras configurações de atuadores que por ação desse mesmo

campo magnético façam também o controlo da passagem do fluido. Dependendo do tipo de válvula, quando o solenoide está ativo, o atuador irá permitir (válvula *fail closed*) ou impossibilitar (válvula *fail open*) a passagem do fluido. Estas válvulas têm geralmente uma mola a elas associada que garante o total regresso do atuador ao seu estado de offset (repouso).

Tendo em vista o contínuo melhoramento da qualidade e a rentabilidade dos seus equipamentos, a Bosch Termotecnologia tem interesse em explorar a possibilidade de substituição das válvulas de tipo solenoide atualmente em uso nos seus esquentadores por válvulas alternativas, capazes de otimizar o controlo do caudal e queda de pressão de gás das referidas válvulas em serviço bem como controlar o preço por minimização do recurso à utilização de metais como o cobre, atualmente necessário ao fabrico dos solenoides para estas válvulas.

Com esta substituição desejar-se-ia também a eliminação de colagens do êmbolo originadas por incumprimento das apertadas tolerâncias dimensionais dos fabricantes e a eliminação do som da ativação das válvulas de ignição direta.

## 1.2. A proposta: válvulas piezoelétricas

Como alternativa às válvulas atuadas por solenoide surgem outros tipos de válvulas que utilizam como mecanismo atuador o deslocamento induzido por materiais que se deformam mecanicamente por ação de um estímulo elétrico e vice-versa, i.e. materiais piezoelétricos.

Este tipo de materiais permitem um controlo bastante rigoroso da sua deformação através da diferença de potencial que lhes é aplicada. No caso dos atuadores piezoelétricos, é possível fazer-se uma monitorização do seu deslocamento e dessa forma controlar (modelar) a passagem de fluido permitida pela válvula. Assim sendo deixa de ser necessário a utilização um jogo de válvulas e camaras de armazenamento de fluido para se controlar finamente o seu caudal. De referir ainda que as deslocações associadas a este tipo de atuadores são bastante precisas. Os materiais piezoelétricos

apresentam-se pois como uma opção interessante para substituição de um sistema de atuação de solenoide.

Para além destas vantagens competitivas, técnicas e económicas, face aos seus concorrentes de mercado, a Bosch Termotecnologia adquire e consolida conhecimento técnico-científico, potenciador de autonomia para catapultar outro tipo de produtos baseados na atuação piezoelétrica.

O presente projeto tem assim como objetivo geral explorar a possibilidade de incorporar um atuador piezoelétrico nas atuais válvulas de solenoide, melhorando as suas condições de operação e funcionamento, e em particular alcançar a prova de conceito usando como base de estudo numa das microválvulas em uso nos esquentadores atmosféricos produzidos pela Bosch.

### 1.3. Organização da tese

O presente relatório está estruturado em 6 secções.

Na secção que se segue, capítulo 2, apresenta-se o estado da arte associado às válvulas de solenoide (descrição dos seus componentes e do seu comportamento, tipologias e aplicações), são apresentadas as válvulas utilizadas pela Bosch, é feita uma contextualização da teoria e dos conceitos associados aos materiais piezoelétricos e por fim são mencionadas as válvulas com atuadores piezoelétricos. Nesta última subsecção são referidos quais os tipo de atuadores e as propriedades que os caracterizam.

No capítulo 3 avança-se com uma proposta de atuador piezoelétrico para cada uma das válvulas em estudo.

No capítulo 4 são apresentados os ensaios experimentais a realizar para se caracterizar as condições de escoamento da microválvula, é selecionado o atuador a incorporar na mesma e são referidos os ensaios experimentais a realizar. Para a prova de conceito, é proposto a conceção de um protótipo onde seja possível a incorporação

do atuador proposto e que simule as condições de operação da atual microválvula (foram mantidas as dimensões dos orifícios de admissão e saída de fluido).

No capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais descritos no capítulo 4.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado.

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

# **2. Estado da Arte**

CONFIDENTIAL

## Estado da arte

Uma válvula é um dispositivo que permite regular o fluxo de um fluido numa conduta. Tem a ela associada um corpo de retenção de fluido, uma entrada e uma saída de fluido e um elemento de fecho móvel que permite ou restringe a passagem do mesmo.

Existem vários tipos de válvulas que podem genericamente classificar-se como manuais ou automáticas. As válvulas manuais são operadas manualmente e as válvulas automáticas são ativadas por um sinal externo, normalmente elétrico ou pneumático. Entre as válvulas automáticas podem destacar-se as válvulas de controlo pneumático, ativadas por ar comprimido (como por exemplo a válvula de borboleta, a válvula de retenção e a válvula de globo, entre muitas outras), e as válvulas de solenoide e piezoelétrica, ambas ativadas por um sinal elétrico.

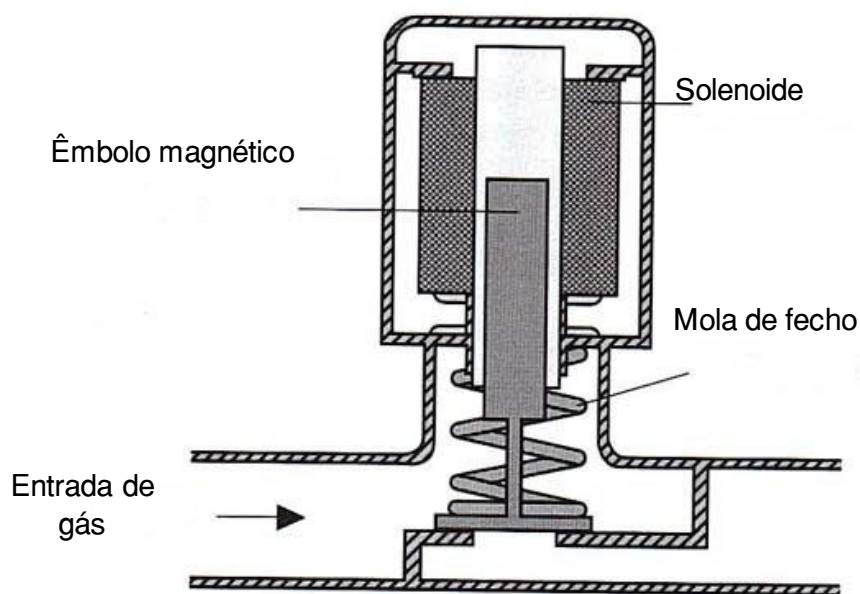
### 2.1. Válvulas de solenoide

As válvulas de solenoide são válvulas eletromagnéticas fundamentalmente constituídas por um êmbolo que se afasta ou aproxima relativamente a um obturador, viabilizando um maior ou menor fluxo do fluido em causa (Figura 1). O êmbolo encontra-se rodeado por um solenoide que quando ativado por um campo elétrico cria um campo magnético que controla a seu deslocamento. A descrição detalhada da estrutura deste tipo de válvulas e as principais equações matemáticas que regem o seu comportamento são seguidamente descritas.

#### 2.1.1. Estrutura da válvula de solenoide e equações do seu comportamento



A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, um exemplo de uma válvula de solenoide, em que o êmbolo está posicionado de forma a bloquear a passagem do fluído. Como se representa na Figura, desta válvula fazem parte: o êmbolo magnético, o solenoide e a mola de fecho, que suporta a posição aberta ou fechada da válvula.

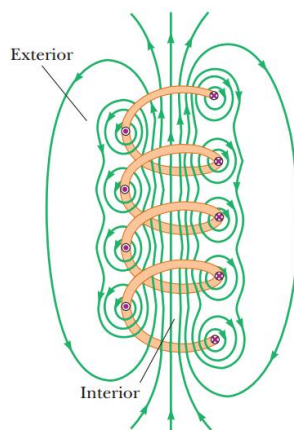


*Figura 1 - Exemplo de uma válvula de solenoide de regulação do fluxo de gás, de atuação direta <sup>1</sup>.*

Para que o fluído possa fluir é necessário que o êmbolo se movimente para uma posição em que o orifício de passagem do fluído seja desobstruído. A passagem de corrente elétrica através do solenoide cria um campo magnético sob a ação do qual e auxiliado pela mola de fecho, o êmbolo desce (ou sobe) e obstrui (ou desobstrui) a passagem do fluído.

Um solenoide é constituído por um fio condutor (normalmente cobre) de elevado comprimento, e enrolado na forma de hélice. Cada enrolamento do fio é designado por espira. Quando as espiras estão suficientemente juntas é possível criar-se um campo magnético razoavelmente uniforme num pequeno volume definido no interior do solenoide. Porém, quando as espiras se encontram muito espaçadas, cada espira pode

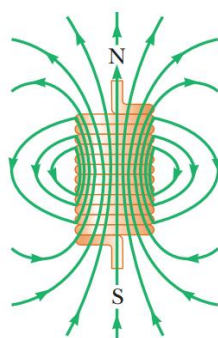
ser encarada individualmente e o campo magnético resultante é igual à soma vetorial dos campos associados a cada uma das espiras <sup>2</sup>, como se ilustra na Figura 2.



*Figura 2 - Linhas de campo magnético de um solenoide com espiras espaçadas <sup>3</sup>.*

As linhas observadas no interior do solenoide indicam a presença de um campo magnético uniforme uma vez que se encontram muito próximas umas das outras e com uma distribuição quase uniforme. Como as linhas no exterior do solenoide se tendem a cancelar mutuamente, o campo magnético fora do solenoide é fraco e não uniforme <sup>2</sup>.

A Figura 3 ilustra a disposição das linhas de campo magnético de um solenoide de comprimento finito cujas espiras se encontram bastante próximas.



*Figura 3 – Linhas de campo magnético de um solenoide de comprimento finito, percorrido por uma corrente constante, quando as suas espiras se encontram muito próximas <sup>2</sup>.*

Neste caso, a configuração das linhas de campo é bastante semelhante às que caracterizam uma barra magnética. Pode assim afirmar-se que uma das extremidades do solenoide se comporta como um polo norte e a outra como um polo sul (as linhas de campo viajam do norte para o sul). A uniformidade do campo magnético no interior do solenoide aumenta à medida que o seu comprimento também aumenta. A configuração de um solenoide aproxima-se da ideal quando as suas espiras se aproximam até ficarem muito juntas e o seu comprimento se apresenta bastante elevado quando comparado com o raio das espiras. Num solenoide com estas características o campo magnético no seu exterior é relativamente fraco quando comparado com o que se estabelece no seu interior (região de grande volume) <sup>2</sup>.

Segundo a lei de Ampère, o campo magnético **B** gerado no interior de um solenoide é dado pela equação 1 <sup>2</sup>.

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I = \mu_0 \cdot n \cdot l \cdot I \quad (Eq.1)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade no vácuo,  $I$  a corrente que o percorre,  $N$  o número de espiras e  $l$  o comprimento do solenoide ( $\frac{N}{l} = n$ ). A equação anterior (eq.1) só é válida em regiões próximas do centro um solenoide muito comprido. Como se pode concluir observando as linhas de campo de um solenoide, o campo magnético nas regiões mais próximas das suas extremidades é menos intenso do que o calculado pela equação 1. Na extremidade propriamente dita, o módulo do campo magnético é cerca de metade do que se faz sentir no centro do referido solenoide <sup>2</sup>.

Como anteriormente dito, neste tipo de válvulas o êmbolo (o atuador) é um cilindro com um diâmetro da ordem dos milímetros que possui propriedades magnéticas. Para se poder descrever a polarização permanente interna do magneto utiliza-se um modelo de equivalente de carga que é descrito na Figura 4.

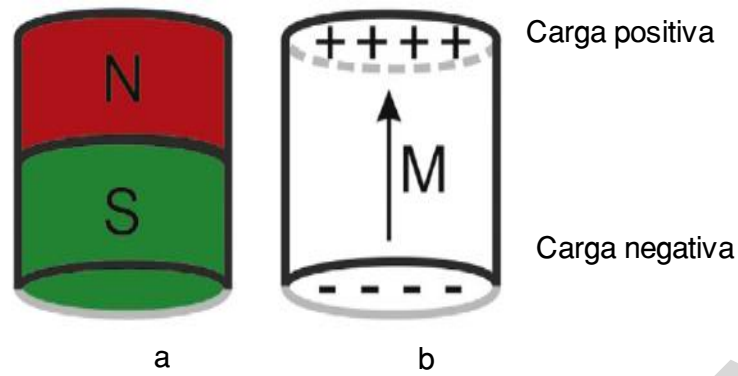


Figura 4 - a) representação esquemática de um êmbolo magnético e respectivos polos; b) representação do modelo de carga equivalente a do êmbolo e a sua correspondente magnetização <sup>4</sup>.

Se a magnetização interna do êmbolo for descrita como **M**, a densidade do fluxo do campo magnético **B** relaciona-se com a intensidade do mesmo (**H**) através da equação 2 <sup>4</sup>.

$$B = \mu_0(M + H) \quad (Eq. 2)$$

Para se ter em consideração a interação do êmbolo e do solenoide é necessário estabelecer-se um referencial de variáveis geométricas. Visto que o êmbolo se move ao longo do eixo z, a Figura 5 apresenta um esquema que permite relacionar as posições dos dois elementos nesse mesmo eixo <sup>4</sup>.

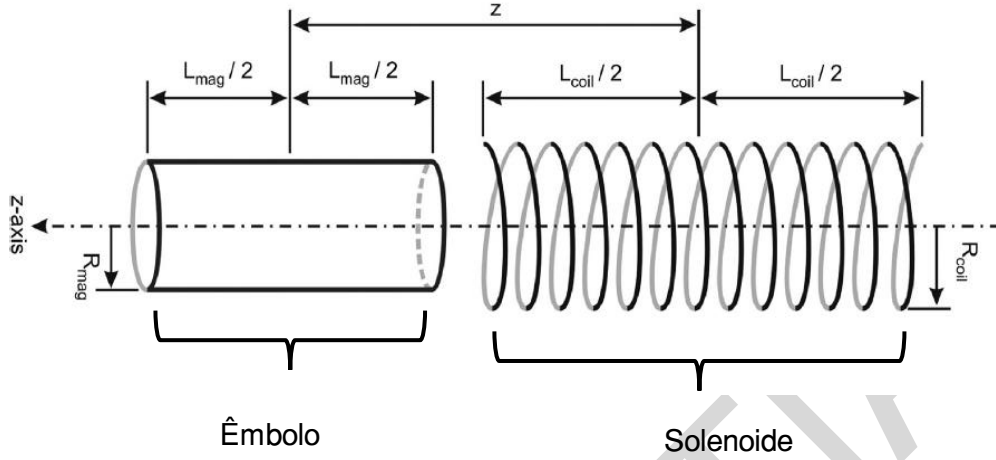


Figura 5 - Referencial de variáveis geométricas que relaciona as posições do êmbolo e do solenoide <sup>4</sup>.

Considerando que o êmbolo possui uma magnetização fixa e orientada segundo o eixo  $z$  (como descrito na Figura 5) existe um mínimo de energia quando este se encontra no centro do solenoide. Assim sendo, esse será o ponto de origem do referencial apresentado <sup>4</sup> e a localização do êmbolo em relação ao centro do solenoide é dada por  $z$  (Figura 5).

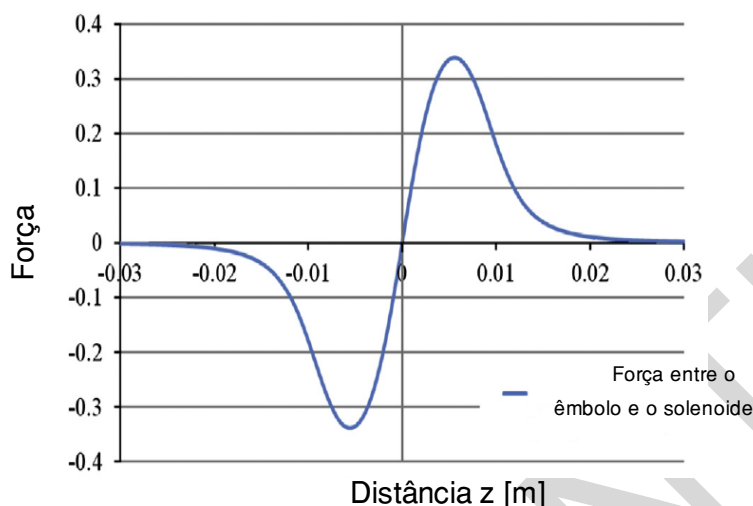
O campo magnético gerado por um solenoide com comprimento  $L$ ,  $N$  espiras, percorrido por uma corrente elétrica  $I$  é dado pela equação 3 <sup>4</sup>.

$$B_{solenoid}(z) = \frac{\mu_0 N I}{2L_{coil}} \left( -\frac{z - \frac{L_{coil}}{2}}{\left(\left(\frac{z - L_{coil}}{2}\right)^2 + R_{coil}^2\right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{z + \frac{L_{coil}}{2}}{\left(\left(\frac{z + L_{coil}}{2}\right)^2 + R_{coil}^2\right)^{\frac{1}{2}}} \right) e_z \quad (Eq. 3)$$

É também possível calcular-se a força magnética  $F_{mag}$  que atua no êmbolo fazendo-se uso da equação 4 <sup>4</sup> (e tendo em conta algumas aproximações <sup>4</sup>).

$$F_{mag}(z) = \pi M R_{mag} \left( -\left(B_{solenoid}\right)\Big|_{\left(z - \frac{L_{plunger}}{2}\right)} + B_{solenoid}\Big|_{\left(z + \frac{L_{plunger}}{2}\right)} \right) \quad (Eq. 4)$$

Pode-se assim recorrer à equação 4 para descrever a variação da força magnética existente entre o êmbolo e o solenoide em função da posição relativa do êmbolo. A Figura 6 apresenta graficamente essa relação.



*Figura 6 - Comportamento típico da força magnética entre o êmbolo e o solenoide, com a variação de z. Os valores da figura foram obtidos para uma corrente de atuação de 11 A; com um solenoide de 8mm de altura, com raio interno de 4,5 mm e com 105 espiras; o êmbolo tinha de raio 1 mm, 10 mm de comprimento e uma magnetização de  $10^6 \text{ A/m}^4$ .*

O gráfico da Figura 6 confirma o que já foi referido: a força magnética assume um valor mínimo quando os centros do êmbolo e do solenoide estão sobrepostos. São observados ainda valores máximos e mínimos a distâncias bem definidas.

Assim sendo-se, o magneto deve ser dimensionado tendo em conta o que acima foi referido: com o seu centro coincide com o centro do solenoide, este não está sujeito a nenhuma força magnética.

A corrente que percorre o solenoide é responsável pelo deslocamento do êmbolo, mas uma vez deslocado, este precisa ser mantido numa determinada posição. Para que tal possa acontecer o solenoide necessita de ser alimentado com uma corrente elétrica que é cerca de 30% da sua corrente nominal, chamada de corrente de retenção <sup>5</sup>.

A monitorização do movimento do êmbolo torna-se deveras importante para uma correta regulação do fluxo de gás. Existem algumas técnicas que podem ser usadas

para o conseguir. Mais tarde nesta tese este assunto será alvo de análise mais detalhada.

A equação 5<sup>5</sup> traduz o comportamento elétrico do solenoide<sup>5</sup>.

$$U = iR + \frac{\delta\Psi(i,x)}{\delta i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\delta\Psi(i,x)}{\delta x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (Eq.5)$$

Nesta equação  $U$  corresponde à diferença de potencial aplicada,  $R$  à resistência do solenoide,  $\Psi$  ao fluxo magnético total e  $x$  é na verdade uma função  $x(t)$  que traduz o movimento do êmbolo em relação referencial apresentado na Figura 7.

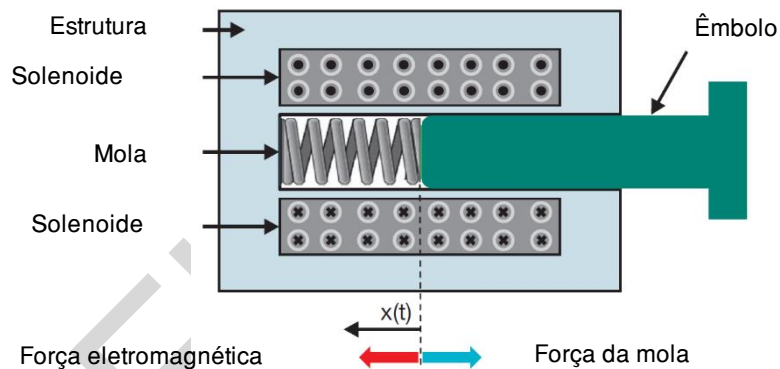


Figura 7 - Representação esquemática de uma válvula de solenoide e a representação o referencial da função  $x(t)$ <sup>5</sup>.

O segundo e terceiro termo da equação 5 referem-se à alteração da força magnética induzida pelo movimento do êmbolo<sup>5</sup>.

Existem várias formas de se detetar o movimento do embolo. A mais usada recorre à análise do perfil de corrente do solenoide em função do tempo da sua aplicação. Na Figura 8 está representado um perfil de corrente comum de um solenoide de uma válvula, i.e. variação da corrente do solenoide com o tempo.

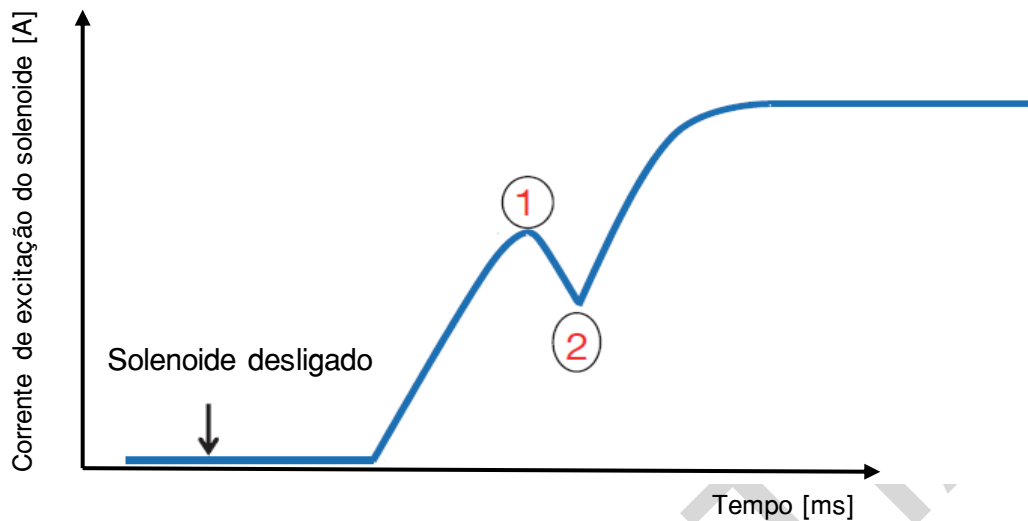


Figura 8 – Corrente de excitação característica de um solenoide <sup>5</sup>.

Inicialmente, quando o solenoide se encontra desligado, a intensidade de corrente é nula. O ponto 1 da curva da Figura 8 corresponde ao início do movimento do êmbolo. À medida que o êmbolo se desloca a intensidade de corrente vai diminuindo, devido à alteração que este causa na força eletromagnética anteriormente referida, até atingir um valor mínimo que corresponde ao ponto 2. Nessa altura o êmbolo já terá completado todo o seu percurso. Seguidamente a corrente de excitação do solenoide aumenta até atingir o seu máximo que é imposto pela resistência do mesmo <sup>5</sup>.

O comportamento da curva apresentada na Figura 8 pode ser deslocado verticalmente com a alteração da temperatura de funcionamento de solenoide e dessa forma alterar os valores absolutos do ponto 1 e 2 (Fig.8). Para se contornar os possíveis erros induzidos por essa alteração utiliza-se como medida a diferença de intensidades dos picos 1 e 2 (Figura 8) (que é constante e independente da temperatura) para se monitorizar o movimento do êmbolo.



## 2.1.2. Tipologias de válvulas de solenoide e aplicações

As válvulas de solenoide podem ser classificadas quanto ao seu número de canais de passagem de fluido, apenas tem em linha de conta o seu modo de operação e ainda de acordo com o seu estado de atuação normal.

Tendo em conta o número de vias ou canais de entrada ou saída de fluido, podem identificar-se diferentes tipologias de válvulas de solenoide, designadamente as de duas, três, quatro ou cinco vias.

Dentro deste critério, destacam-se então as chamadas válvulas de solenoide de 2 vias (2-way) que possuem apenas uma entrada e uma saída associada ao mesmo orifício como se ilustra na Figura 9.

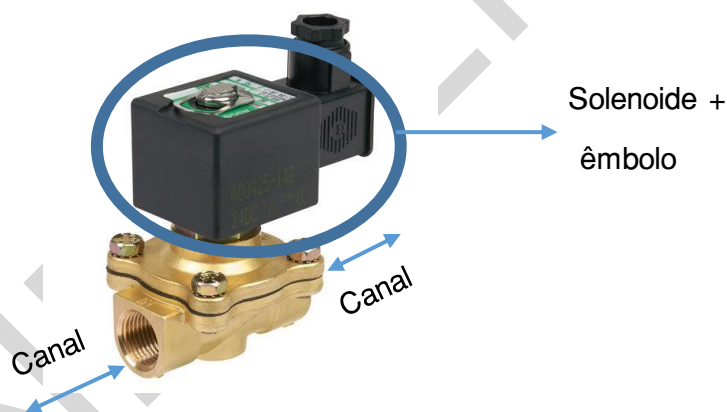


Figura 9 – Válvula com atuação através de solenoide em configuração de 2 vias (2-way) (Ref. ASCO Series 238) <sup>6</sup>.

Ainda dentro da mesma categoria de válvulas merece referência a válvula de três vias.

Esta válvula possui três canais para passagem do fluido. A Figura 10 ilustra este tipo de configuração.

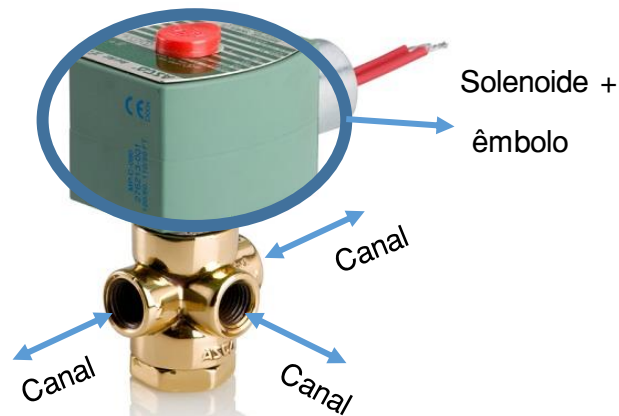


Figura 10 - Válvula com atuação através de solenoide em configuração de 2 vias (2-way) (ref. ASCO Series 320) <sup>7</sup>.

Por fim de referir ainda as válvulas de solenoide de 4 ou 5 vias. Esta tipologia de válvula de solenoide possui 5 possibilidades de conexão a tubos de passagem de fluido, sendo que pode operar também com apenas 4. Pode observa-se uma válvula deste tipo na Figura 11.

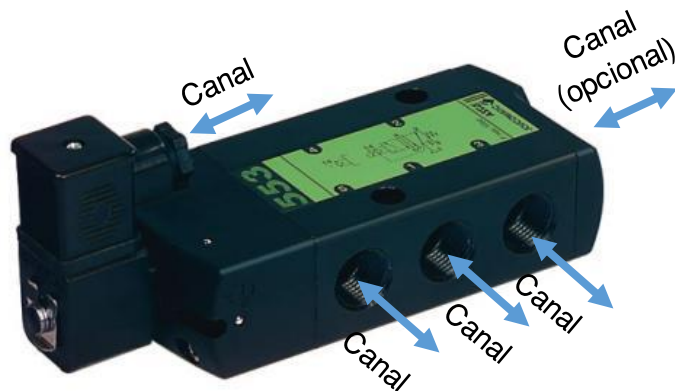


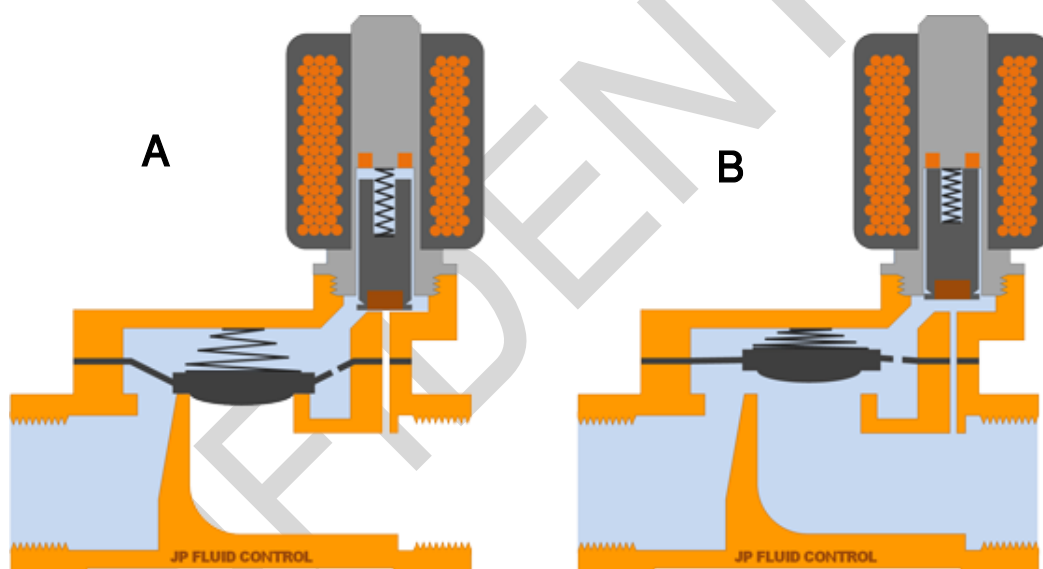
Figura 11 - Válvula com atuação através de solenoide em configuração de 4 vias (4-way) (Ref. ASCO Series 238) <sup>6</sup>

Dando agora ênfase ao seu modo de operação, destacam-se as válvulas de solenoide de operação direta e as de operação piloto.

As válvulas de operação direta dependem apenas da sua energização para atuarem. Por conseguinte quando o solenoide está ativado o êmbolo mecânico sobe e

quando a corrente cessa, o êmbolo desce e impede a passagem do fluido. No caso destas válvulas, a operação não depende da pressão do fluido <sup>6</sup>.

Quanto às válvulas de operação piloto, estas utilizam a pressão de entrada do fluido ou a pressão total do canal para operar <sup>6</sup>. O seu modo de operação está ilustrado na Figura 12. Nesta tipologia de válvula o atuador que irá obstruir a passagem do fluido está ligado a uma membrana que é pressurizada por uma câmara de armazenamento de fluido (Figura 12 A). Quando a pressão na referida câmara é aliviada (através da abertura de uma válvula nela presente) a membrana juntamente com o atuador sobem e a passagem do fluido fica livre (Figura 12 B).



*Figura 12 – Válvula de solenoide de operação piloto. Na situação A) o atuador é pressurizado pelo fluido armazenado na primeira câmara e obstrui a passagem de gás. Em B) é aberta uma válvula que alivia a pressão na referida câmara e o atuador sobe. Dessa forma permite a passagem do fluido <sup>8</sup>.*

Por fim, este tipo de válvulas atuadas por solenoide podem ainda ser catalogadas de normalmente abertas e normalmente fechadas. As normalmente abertas são válvulas com uma configuração que permite a passagem do fluido quando não estão energizadas. Quando o solenoide é ativo o movimento do atuador é no sentido de obstruir a passagem do fluido. A configuração das normalmente fechadas é exatamente

a contrária: quando não se encontram energizadas param o fluxo do fluido e ao serem ativadas permitem a passagem do mesmo.

As válvulas de solenoide acima apresentadas podem ser utilizadas com vários tipos de fluídos como por exemplo ar, vapor de água, óleo ou gases inertes.

Existem diversas aplicações para este tipo de válvulas. Entre as aplicações domésticas podem ser destacadas <sup>8</sup>:

- Sistemas pneumáticos e hidráulicos
- Sistemas de ar comprimido
- Sistemas de aquecimento central
- Sistema de rega automáticos
- Sistemas de injeção de combustível em automóveis
- Equipamento médico e dentário
- Ar condicionado

### 2.1.3. Válvulas Bosch: macroválvulas e microválvulas e coeficientes de descarga das válvulas

Como anteriormente referido, a Bosch Termotecnologia utiliza válvulas de solenoide para regular a passagem de gás nos seus esquentadores. Estas são classificadas como macroválvulas ou microválvulas, dependendo das suas dimensões.

As macroválvulas são utilizadas em dispositivos de ignição (operação) direta e as microválvulas em dispositivos de ignição (operação) piloto.

As macroválvulas são incorporadas num dispositivo de ignição direta que se procurou esquematizar na Figura 13 admitem dois fluxos de entrada: o de gás e o de água. O controlo da passagem de gás é primeiramente assegurado pela macroválvula, que assume apenas duas posições: ON ou totalmente aberta (quando o solenoide está energizado) ou OFF ou totalmente fechada (na ausência de corrente no solenoide) ou seja, não desempenha qualquer papel de modelação. Depois de passar por esta primeira válvula o fluxo de gás é posteriormente controlado de forma manual pelo

utilizador do esquentador, quando este manuseia a torneira de água em serviço. Enquanto tal não acontece, o gás fica armazenado numa conduta até que, sob a ação do fluxo de água (abertura da torneira de água de serviço pelo utilizador), se mova um conjunto de membranas e êmbolos que viabilizem o fluxo de gás. O caudal de água que alimenta este dispositivo *modela* o fluxo de gás, ou seja, a elevados fluxos de água corresponderão elevados fluxos de gás a alimentar o queimador. Deste modo viabiliza-se o controlo da temperatura da água.

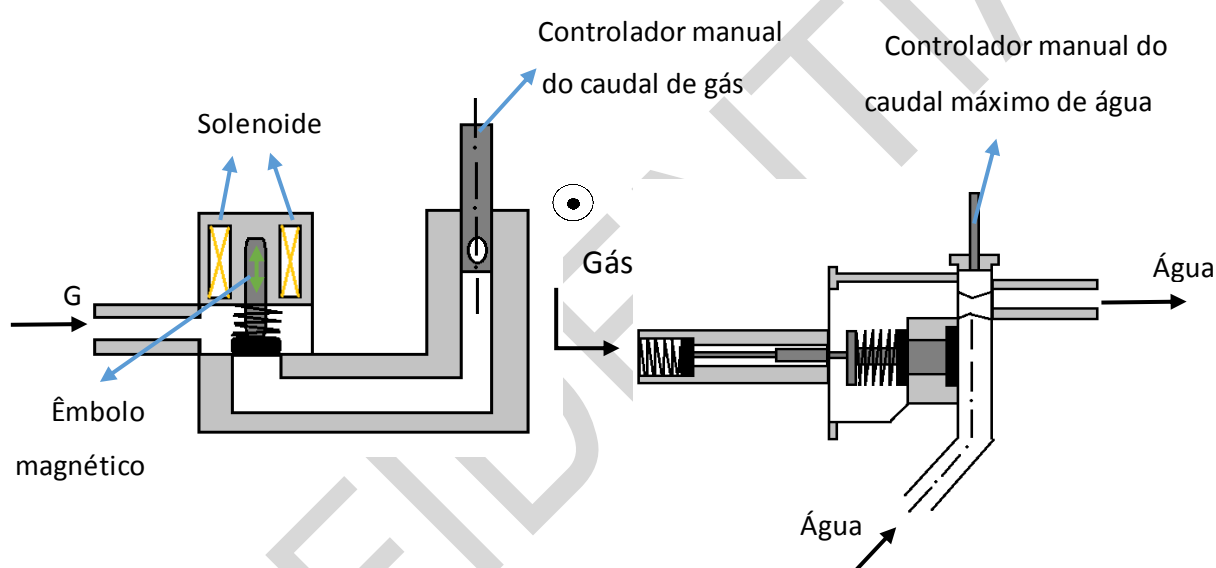
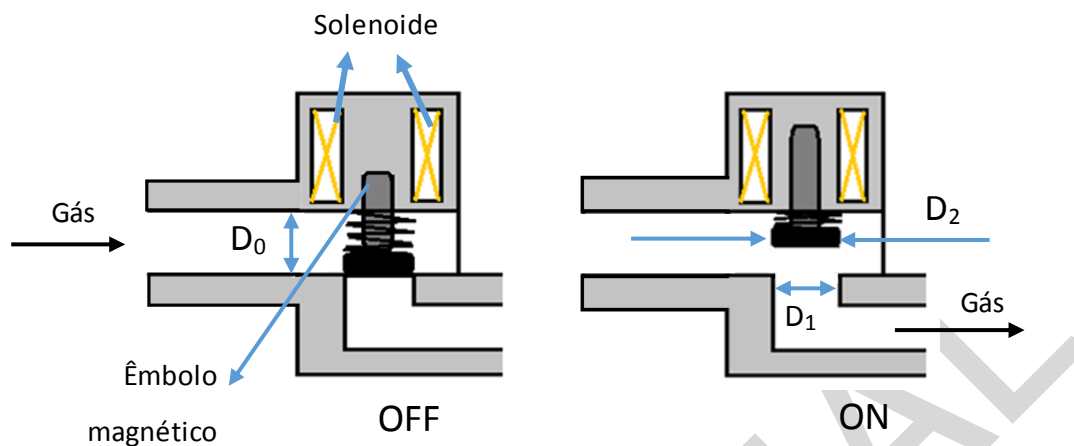


Figura 13 - Representação esquemática do dispositivo de ignição direta.

Na Figura 14 esquematizou-se com detalhe o modo de atuação da macroválvula e identificam-se também alguns dos parâmetros dimensionais que a caracterizam.



*Figura 14 - Representação esquemática da válvula de solenoide (macroválvula) presente no dispositivo de ignição direta. Neste esquema destaca-se diâmetro da conduta de admissão do gás ( $D_0$ ), diâmetro do orifício de passagem do gás ( $D_1$ ) e diâmetro do selante ou extremidade do êmbolo ( $D_2$ ).*

Como referido, quando o solenoide da macroválvula é percorrido por uma corrente elétrica, estabelece-se um campo eletromagnético sob a ação do qual o êmbolo magnético sobe, deixando de obstruir a passagem de gás. Quando cessa a corrente no solenoide, o êmbolo desce. A existência de uma mola garante que o êmbolo recupera totalmente a sua posição inicial ou ponto de repouso.

Neste tipo de válvulas o êmbolo magnético tem um curso de 2 a 3 mm. No desenho atual da válvula Bosch o diâmetro do tubo de admissão do gás ( $D_0$ ) é de 11.85 mm e o diâmetro do orifício de passagem do gás ( $D_1$ ) é de 8.35 mm.

Com um caudal mássico de gás natural de 0.52 g/s e densidade de 0.71 kg/m<sup>3</sup>, a válvula com as dimensões acima referidas ocasiona uma queda de pressão de 1000 Pa (queda de pressão observada na passagem do gás pelo orifício de diâmetro  $D_1$ ). Quando o solenoide é ativado, para que o atuador (êmbolo magnético) se mova, tem de gerar uma força superior a 1N. Quando atingido o máximo do seu deslocamento ( $x$ ) ( $x = 3\text{mm}$ ) o atuador tem de superar uma força de 2 N. Estes valores foram calculados com base na equação 6 e levando em consideração uma constante de mola ( $K_{\text{mola}}$ ) com o valor  $K_{\text{mola}}=0.4 \text{ N/mm}$  e um diâmetro de selante ( $D_2$ ) de 1.43 cm.

$$F = K_{mola}x + 2F_{gás\ 10\ mbar} \quad (Eq. 6)$$

$F_{gás\ 10\ mbar}$  designa a força gerada pelo fluido no sentido contrário ao seu movimento que se faz sentir no selante do atuador. Esta força é também chamada de força de “backflow” e gera uma pressão de 10 mbar nesse mesmo selante.

No que se refere às microválvulas, estas apresentam deslocamentos de atuador menores, quando comparados com os observados na macroválvula. Cerca de 1 mm.

Identificam-se dois tipos de microválvulas: as normalmente abertas ou *fail open* FO (na ausência de sinal de ativação assumem a posição “aberta”)(fig. 15 A) e as normalmente fechadas ou *fail closed* FC (na ausência de sinal assumem a posição “fechada”) (fig. 15 B). Ambas são utilizadas num dispositivo de ignição piloto designado por DV2, como esquematizado na Figura 15.

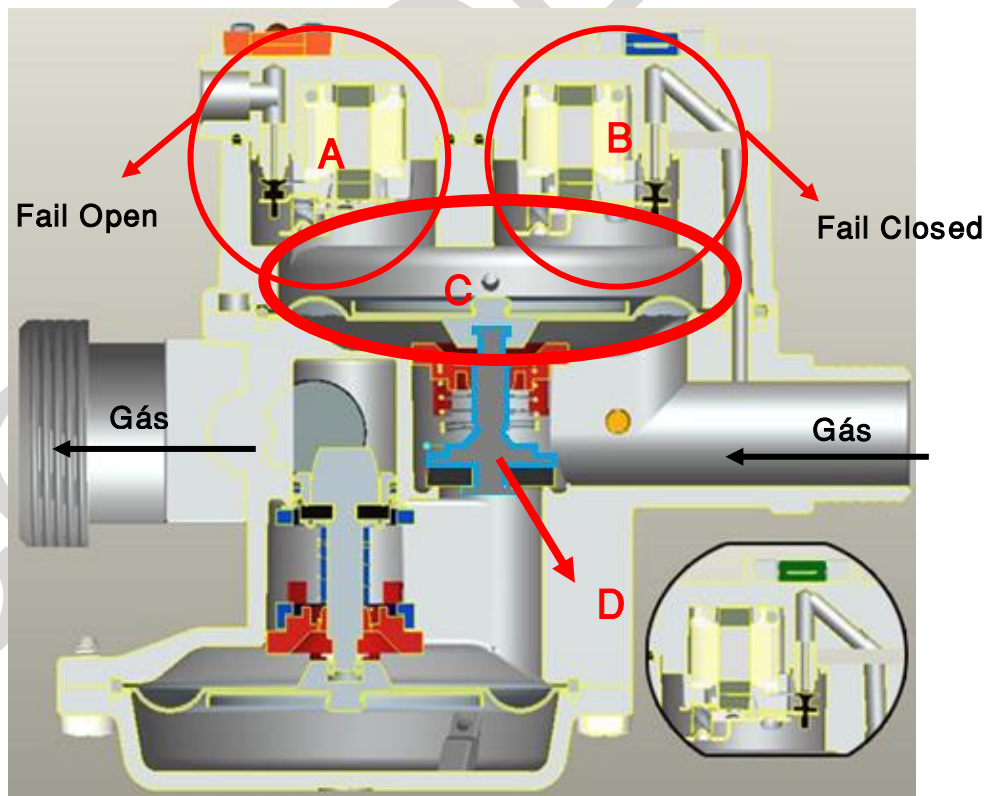


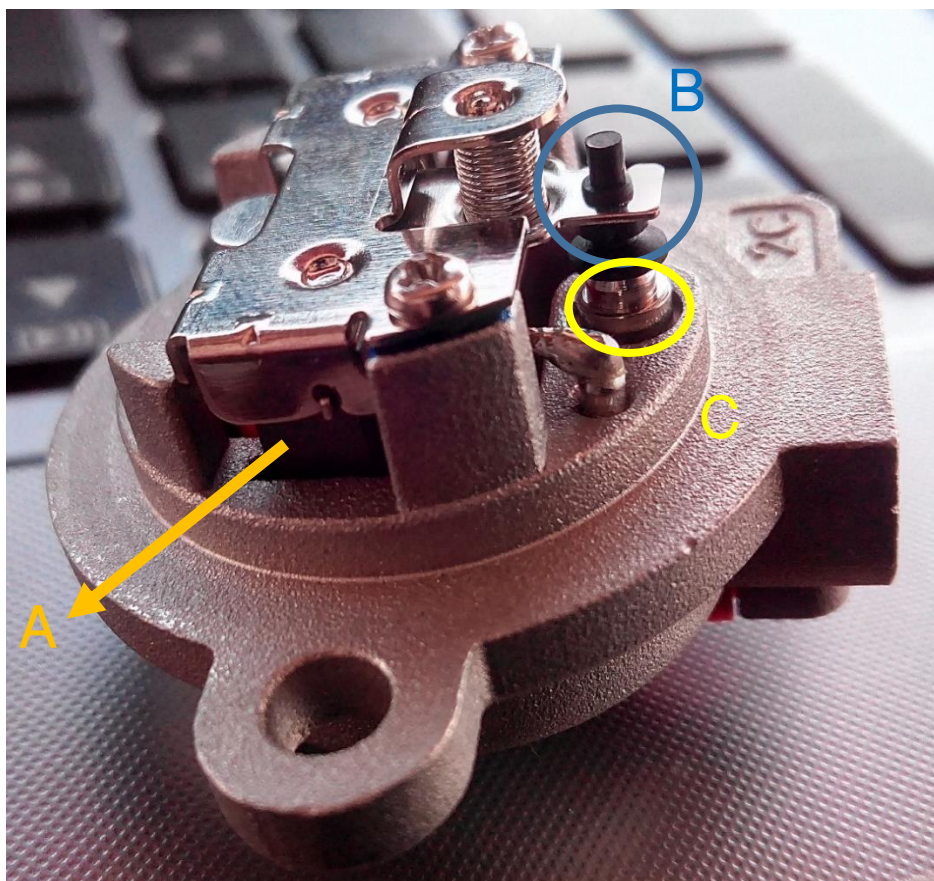
Figura 15 - Representação esquemática do dispositivo de ignição piloto DV2 <sup>9</sup>, ilustrando a microválvula normalmente fechada A), a microválvula normalmente aberta B), a câmara de armazenamento de gás C) e o êmbolo atuador D).

Estes dois tipos de microválvulas apresentam uma configuração bastante diferente entre si. Sempre que as válvulas são energizadas, o seu estado de repouso é alterado e tem lugar uma atuação: a válvula normalmente aberta obstrui a passagem de gás e a válvula normalmente fechada, por sua vez, permite a passagem de gás.

Na Figura 16 pode ser observada uma imagem da microválvula normalmente fechada.

Estes dois tipos de microválvulas apresentam algumas semelhanças entre si: ambas são atuadas por ação de placas ferrosas que rodeiam o solenoide. Quando o solenoide é ativado, gera-se um campo magnético que aproxima as placas metálicas (figura 16 A), dependendo do tipo de montagem, o atuador irá obstruir (figura 16 B) (na normalmente aberta) ou permitir (na normalmente fechada) a passagem do gás (figura 16 C).





*Figura 16 - Imagem de uma microválvula normalmente fechada utilizada pela Bosch no seu dispositivo DV2. Nesta imagem está evidenciado: A) as placas ferrosas, B) o atuador e C) a passagem de gás.*

Em ambas as microválvulas, e à semelhança do que se observa na macroválvula, existe uma mola que garante que o atuador regresse à sua posição de repouso.

A alimentação de gás ao dispositivo DV2 é assegurada por uma conduta com ligação a uma câmara de pressão. Para que o gás atinja essa mesma câmara, terá que passar pela microválvula FO através de um orifício de passagem de gás com 1 mm de diâmetro (Figura 16 C). Depois de passar pela microválvula FO, o gás fica armazenado (fig. 15 C) na câmara de pressão.

Quando a temperatura de saída da água é inferior à temperatura definida pelo utilizador (temperatura de *set-point*), a microválvula FO mantém-se desativada e a FC é ativada. Deste modo alivia-se a pressão da câmara (em C, fig.15), a membrana

deforma-se e arrasta o êmbolo consigo (D, na fig. 15) o que irá permitir a passagem do fluído. Este comportamento está esquematizado na Figura 17 A.

Se a temperatura de saída da água for superior à temperatura de *set-point*, a microválvula FC é desativada, aumentando a pressão de fluído na câmara e forçando a membrana a descer. Desse modo o êmbolo irá obstruir a passagem do fluído (fig. 17 B).

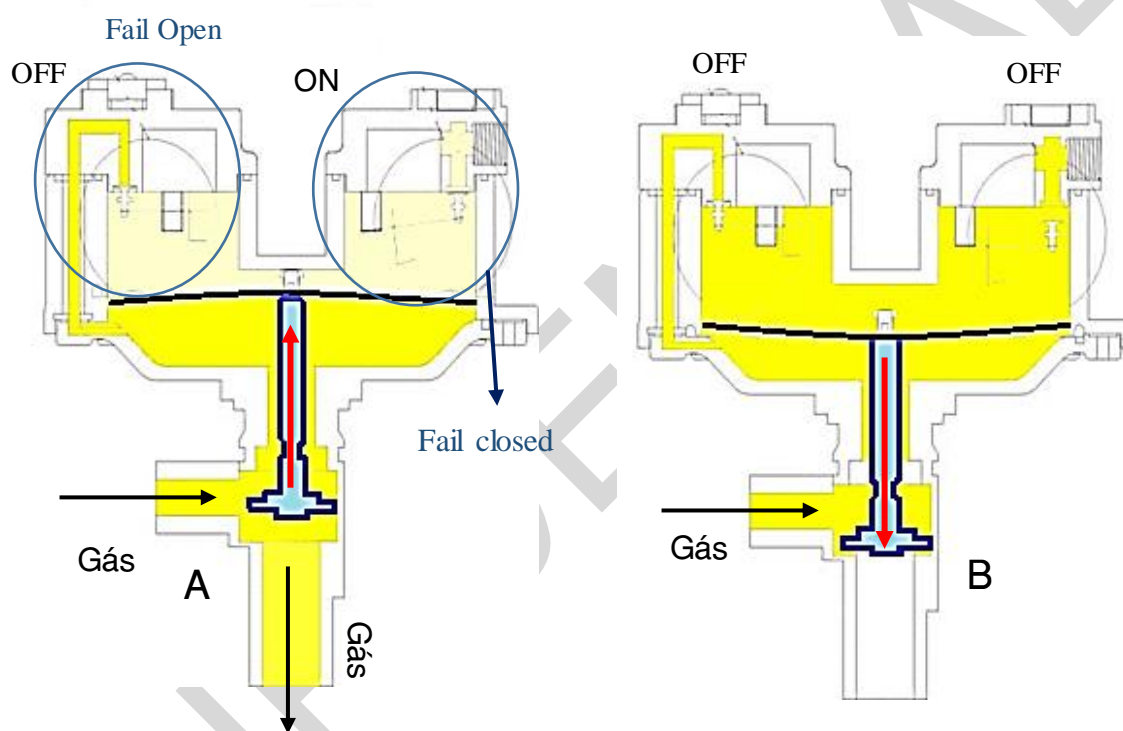


Figura 17 – Princípio de funcionamento do dispositivo de ignição piloto DV2 <sup>9</sup>. A) a microválvula normalmente aberta não está ativa e a normalmente fechada está energizada. B) ambas as microválvulas estão no seu estado de repouso.

Associada à abertura da microválvula FC existe uma chama piloto que consome o gás que flui através dela.

À atuação destas microválvulas está associada uma força de 0.15 N. Para o cálculo deste valor foi utilizada uma constante de mola de 0.13 N/mm e um curso do atuador de 1mm.

A geometria da área de passagem do fluido nas macroválvulas e nas microválvulas é bastante semelhante (apesar do curso do atuador ser diferente). Contudo os diâmetros dos orifícios de passagem do fluido são bastantes diferentes, o que se reflete em coeficientes de descarga distintos.

O coeficiente de descarga  $C_D$  é um parâmetro adimensional que visa corrigir o erro de cálculo que se comete quando se avalia a velocidade média numa conduta com base na medição da queda de pressão registada na passagem do fluido através de uma constricção (orifício) e se desprezam as perdas por atrito. Este coeficiente depende da geometria do orifício, variando assim com as dimensões e o formato da válvula <sup>10</sup>. O coeficiente de descarga pode ser obtido a partir de gráficos empíricos que correlacionam o número de Reynolds, os parâmetros geométricos da válvula e o coeficiente de descarga.

O número de Reynolds ( $Re$ ) é um agrupamento adimensional que traduz uma razão entre forças de inércia ( $\rho u$ ) e forças de viscosidade ( $\mu/D$ ), i, ou seja  $Re = (\rho u D / \mu)$ , em que  $\rho$  designa a densidade do fluido,  $u$  a velocidade do fluido na conduta e  $\mu$  a viscosidade do mesmo. A Figura 18 ilustra a variação de valores de  $C_D$  de um orifício de uma placa com orifício. A geometria e as dimensões características do orifício e da conduta estão representadas na própria Figura. Observa-se que à medida que o Reynolds aumenta o valor do coeficiente de descarga diminui e tende a estabilizar.

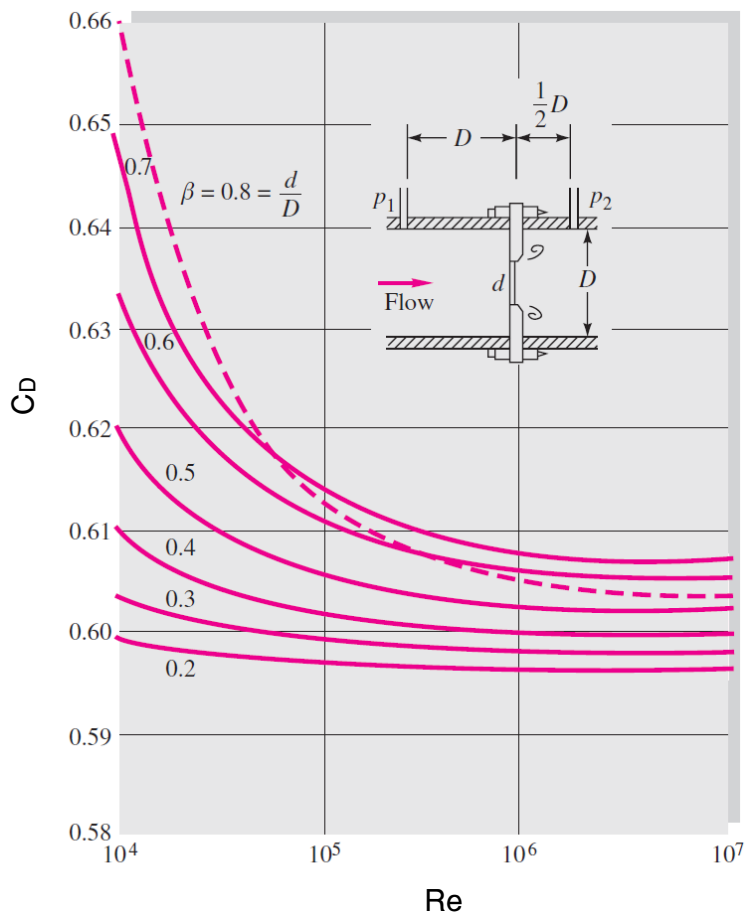


Figura 18 – Variação do coeficiente de descarga com o  $Re$  para uma placa com orifício <sup>10</sup>.

As válvulas de solenoide tem a elas associadas algumas desvantagens.

Este tipo de válvulas apresenta geralmente apenas duas posições: totalmente abertas ou totalmente fechadas uma vez que o seu atuador não apresenta precisão para se deslocar até posições intermédias.

Este tipo de válvulas podem ainda apresentar colagens por acumulação de resíduos na sua sede.

A necessidade de cobre para o fabrico do solenoide é um outro fator a ter em consideração. O cobre é uma matéria-prima cara que torna onerosa a construção da válvula.

Para se colmatarem estes problemas seria interessante recorrer a um material que respondesse por si só quando estimulado eletricamente, funcionando ele próprio como atuador da válvula, eliminando-se desse modo a necessidade de um solenoide.

## 2.2. Materiais piezoelétricos: conceitos

### 2.2.1. Polarização, estrutura cristalina e materiais piezoelétricos

A aplicação de um campo elétrico  $E_j$  [ $V.m^{-1}$ ],  $E$ , a um material isolador, ao provocar o deslocamento dos centros de carga positivos e negativos origina o aparecimento de momentos dipolares elétricos; o material polariza-se. Designam-se estes materiais por dielétricos. Num material dielétrico a relação entre  $E$  aplicado e a polarização,  $P$ , induzida no material é linear e  $P$  desaparece quando  $E$  é removido; estes materiais são os dielétricos lineares.

Uma consequência macroscópica deste fenómeno é a carga de superfície que se observa e que pode ser descrita pelo vetor de polarização  $P_i$  [ $C.m^{-2}$ ] de acordo com a equação 7 <sup>11</sup>:

$$P_i = \chi_{ij}E_j [C.m^{-2}] \quad (Eq. 7)$$

onde  $\chi_{ij}$  [ $F.m^{-1}$ ] são os elementos do tensor de suscetibilidade dielétrica <sup>11</sup>.

A densidade total de carga de superfície induzida pela aplicação de um campo elétrico a um isolador é dada pelo vetor de deslocamento dielétrico  $D_i$  [ $C.m^{-2}$ ] descrito pela equação 8 <sup>11</sup>:

$$D_i = \varepsilon_{ij}E_j [C.m^{-2}] \quad (Eq. 8)$$

A permissividade dielétrica é dada por  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0\delta_{ij} + \chi_{ij}$ , sendo  $\delta_{ij}$  o símbolo de Kronecker ( $\delta_{ij} = 1$  para  $i = j$ ;  $\delta_{ij} = 0$  para  $i \neq j$ ). A permissividade do vácuo,  $\varepsilon_0$ , tem o

valor de  $8,854 \times 10^{-12} [F.m^{-1}]$ . Na maioria das vezes utiliza-se o valor da permissividade dielétrica relativa,  $\epsilon_r$ , também conhecida como constante dielétrica do material  $\epsilon_{r_{ij}} = \frac{\epsilon_{ij}}{\epsilon_0}$ .

Se, na ausência de um campo elétrico, uma deformação mecânica induzir polarização elétrica no dielétrico, este designa-se com sendo piezoelétrico <sup>12</sup>.

Existem regiões num cristal piezoelétrico que possuem uma orientação uniforme da sua polarização espontânea. São designadas de domínios. Quando sujeitos a um campo elétrico, os domínios do material tendem a orientar-se segundo uma determinada direção de acordo com a direção do campo imposto como se ilustra na Figura 19 (cada seta representa um domínio polar). Neste caso o material diz-se polarizado.

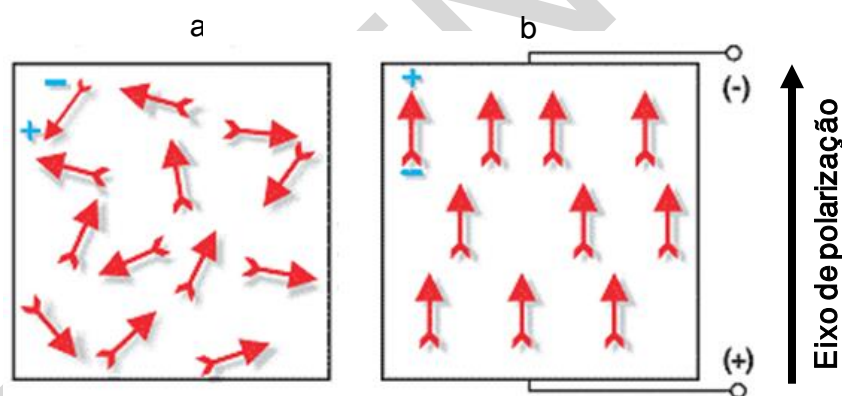


Figura 19 – Representação esquemática da ocorrência de polarização por ação de um campo elétrico: a) os domínios polares encontram-se aleatoriamente orientados; b) observa-se a orientação dos domínios numa determinada direção sob a ação de um campo elétrico de que resulta a polarização do material <sup>13</sup>.

A região que separa dois domínios é designada de fronteira de domínios. Esta fronteira pode tomar diferentes orientações dependendo da posição relativa dos domínios que podem estar orientados sob diferentes ângulos <sup>11</sup>. Por exemplo para materiais com simetria tetragonal a direção entre domínios pode formar ângulos de  $180^\circ$  ou de  $90^\circ$  <sup>12</sup>.

Na Figura 20 pode observar-se uma representação dessas mesmas fronteiras.

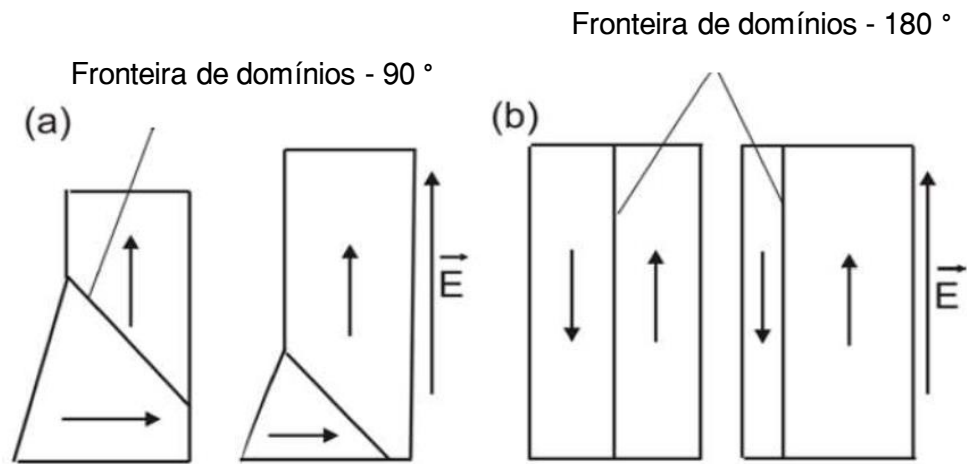


Figura 20 – Representação esquemática de fronteiras de domínios a a) 90° e b) 180°. As setas indicam a polarização no interior do domínio <sup>14</sup>.

Quando na ausência de um campo elétrico os materiais apresentam momentos dipolares devido a uma estrutura cristalina não simétrica, estes exibem polarização espontânea e são designados por piroelétricos <sup>12</sup>.

Um material piroelétrico sofre uma alteração na sua polarização espontânea ( $dP_s$ ) quando se verifica uma mudança temperatura ( $dT$ ). O efeito piroelétrico  $p$  pode ser descrito através da equação 9 <sup>15</sup>.

$$p = \frac{dP_s}{dT} [C.m^{-2}K^{-1}] \quad (Eq. 9)$$

Quando um material com propriedades piroelétricas que tem a capacidade de alterar a direção da sua polaridade espontânea com a aplicação de um campo elétrico é designado de ferroelétrico <sup>15</sup>. Se por outro esta alteração for devida a uma tensão mecânica, o material é denominado de ferroelástico. Estas duas propriedades agora referidas têm de ser verificadas experimentalmente, não podem ser previstas com base na estrutura cristalina do material em questão <sup>15</sup>.

A polarização elétrica nos piro- e ferroelétricos não varia linearmente com o campo aplicado. Nestes materiais o campo elétrico local promoverá o alinhamento dos dipolos

numa determinada região que irá contribuir para o aumento da sua polarização que por sua vez aumentará o campo local. Assim sendo, todo este fenómeno tenderá a alinhar o maior número possível de dipolos na mesma direção, resultando na referida polarização espontânea do material. Estes materiais são então denominados de dielétricos não lineares <sup>12</sup>.

Quando a orientação dos domínios coincide com a orientação do campo, os seus limites expandem à custa dos domínios menos favoravelmente orientados. Quando a orientação dos domínios é oposta à do campo aplicado, estes tendem a inverter a sua orientação seguindo a do campo. Eventualmente, a amostra formará um domínio único para um valor bastante elevado de campo elétrico. A partir desse ponto o material adotará um comportamento típico de um dielétrico linear <sup>12</sup>.

Um fenómeno importante que é necessário ter em consideração quando se utiliza este tipo de materiais é a histerese que eles evidenciam quando respondem a um campo elétrico. A Figura 21 ilustra o comportamento típico de polarização de um piezoelétrico e a orientação dos seus domínios nas várias zonas da curva.

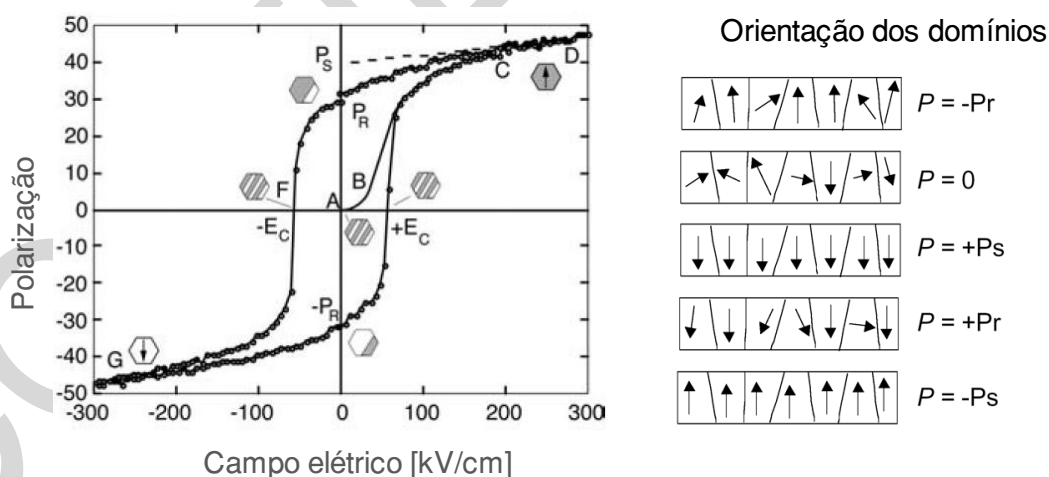


Figura 21 - Curva de polarização em função do campo elétrico aplicado na direção [111], medida numa amostra de um filme sol-gel de  $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.55})O_3$ , com 1.3  $\mu m$  de espessura <sup>11</sup>.

Como referido anteriormente, o estado natural de um material piezoelétrico é caracterizado pela existência de multidomínios, dispostos aleatoriamente, que se



cancelam mutuamente, resultando uma polarização global nula (Figura 21(a)). Na presença de um campo elétrico, os domínios orientam-se numa determinada direção originando uma polarização macroscópica não nula. Para pequenos valores do campo elétrico imposto, a polarização tem um comportamento linear relativamente à amplitude de campo (segmento AB da Figura 21) como preconizado pela equação 8. Nesta região, o campo elétrico não é suficientemente forte para alinhar todos os domínios <sup>11</sup>.

Com o aumento da amplitude do campo elétrico, os domínios começam a orientar-se cooperativamente e de forma mais eficaz segundo a direção que é cristalograficamente mais semelhante à do referido campo elétrico. Consequentemente, observa-se então um aumento mais rápido da polarização do material, descrito pelo segmento BC da Figura 21 <sup>11</sup>. Neste segmento a curva de polarização deixa de se comportar segundo a equação 8. Depois de todos os domínios estarem orientados (ponto C – fig.21) a polarização do material evidencia novamente um comportamento linear, como o de um dielétrico (equação 8), tal como descrito pelo segmento CD, atingindo-se então as condições de polarização de saturação (fig.21). O processo através do qual se orientam todos os domínios segundo uma dada direção é chamado de "poling" ou polarização forçada <sup>12</sup>.

Quando se retira o campo elétrico diminuindo-o, alguns domínios voltam à sua orientação inicial, mas o material permanece polarizado e, mesmo quando o campo elétrico é nulo, a polarização apresenta um valor finito que se designa por polarização remanescente ( $P_r$ , fig.21). Para que se anule a polarização remanescente, o campo elétrico deverá agora variar em sentido oposto (sentido negativo), assumindo o valor do ponto F da Figura 21, que se designa por campo coercivo,  $E_c$ .  $E_c$  é pois o valor do campo necessário para anular a polarização do piezoelétrico e é denominado de campo coercivo.

Um posterior aumento do campo elétrico aplicado em sentido negativo, conduz a um novo alinhamento dos domínios (ponto G). Para que o ciclo de polarização fique completo basta que se aumente o campo aplicado até atingir um valor nulo.

Do ponto de vista da estrutura cristalina dos materiais, podem definir-se trinta e dois grupos pontuais de simetria diferentes para descrever a simetria da célula unitária de um determinado cristal. Os trinta e dois grupos podem ainda ser agrupados em sete sistemas cristalinos: triclínico, monoclínico, ortorrômbico, tetragonal, trigonal, hexagonal e cúbico.

Vinte e um grupos dos atrás referidos não possuem centro de simetria. Entre os vinte e um grupos, vinte possuem propriedades piezoelétricas. Existem então cristais de um grupo sem centro de simetria que não apresentam propriedades piezoelétricas, por combinarem outros fatores simetria. A Figura 22 apresenta uma classificação de materiais com base nos 32 grupos pontuais de simetria.

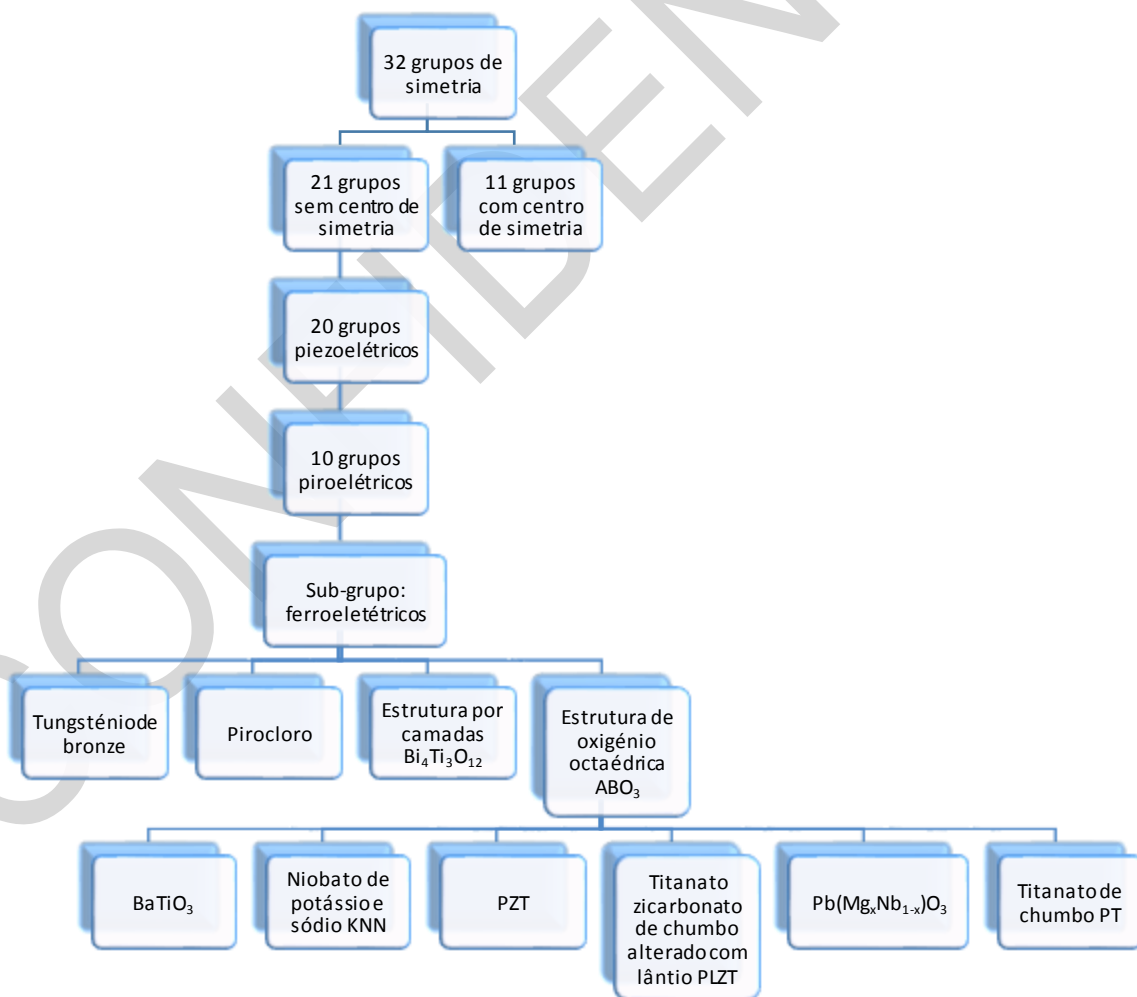


Figura 22 - Classificação dos materiais com base nos grupos pontuais de simetria, adaptado de <sup>16</sup>.

Dentro de todos os materiais apresentados na Figura 22, o  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ , PZT, é sem dúvida o material que lidera o mercado dos sensores e atuadores <sup>16</sup>. No entanto a presença de chumbo pode apresentar variados perigos para a saúde humana e para o meio ambiente. Um dos materiais mais promissores na substituição do PZT é o niobato de potássio e sódio  $\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{NbO}_3$  (KNN). Existem vários estudos em curso com o intuito de viabilizar essa substituição <sup>16</sup>.

No que se refere à temperatura de utilização de materiais piezoelétricos, é necessário ter em consideração a temperatura de Curie ( $T_c$ ).  $T_c$  define, nos piezoelétricos cerâmicos, uma transição de fase. Para uma melhor compreensão do conceito referido, recorre-se ao exemplo do binário  $\text{PbZrO}_3$  -  $\text{PbTiO}_3$  cujo diagrama de fases se apresenta na Figura 23.

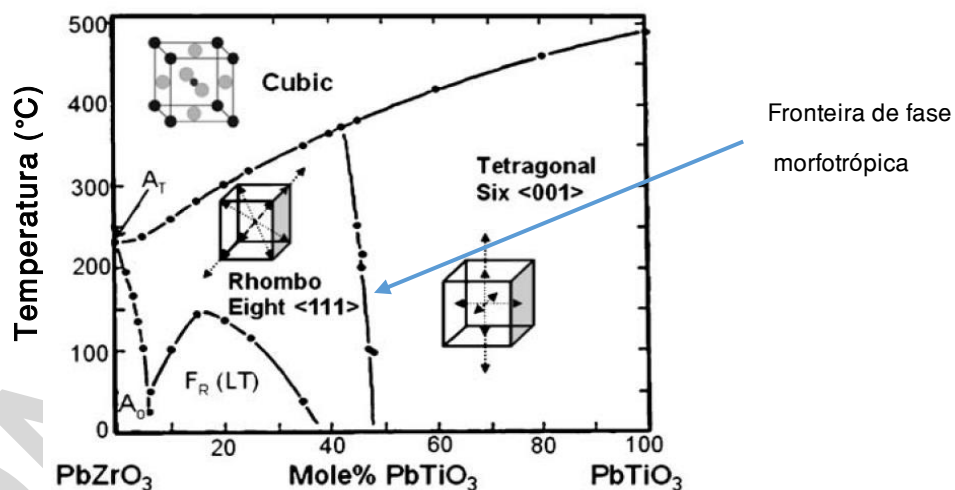


Figura 23 - Diagrama de fases do sistema binário  $\text{PbZrO}_3$  -  $\text{PbTiO}_3$  e identificação da região morfotrópica <sup>17</sup>.

Neste caso verifica-se a formação de soluções sólidas completas entre os dois membros extremos do diagrama,  $\text{PbZrO}_3$  e  $\text{PbTiO}_3$ , identificando-se uma região morfotrópica (MPB, “*morphotropic phase boundary*”) onde coexistem duas fases cristalográficas, a fase tetragonal e a fase trigonal, que ocorre para a composição aproximada de  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ , abreviadamente designada por PZT (52/48). Na MPB as propriedades eletromecânicas do PZT são maximizadas e por essa razão uma das

composições piezoelétricas mais usadas é precisamente o PZT (52/48), por exemplo em atuadores, sensores e transdutores.

Acima de uma determinada temperatura (designada por Temperatura de Curie), qualquer uma destas duas fases se transforma numa outra fase que possui uma estrutura cristalina cúbica, passando o material a ter um centro de simetria. Como já referido, para que um material evidencie propriedades piezoelétricas, a sua estrutura não pode apresentar um centro de simetria (quando tal se verifica, a orientação dos domínios resulta numa polarização nula). Portanto, para temperaturas superiores à temperatura de Curie, o material deixa de apresentar propriedades piezoelétricas e perde a polarização remanescente induzida.

As propriedades piezoelétricas otimizadas próximas da MPB<sup>18</sup> julga-se relacionadas com mecanismos de rotação da polarização devido à coexistência íntima de mais do que uma fase cristalina<sup>19</sup>. O PZT é sem dúvida o material que lidera o mercado dos sensores e atuadores<sup>16</sup>.

A tabela 1 elenca um conjunto de composições de materiais ferroelétricos e suas propriedades eletromecânicas. Do ponto de vista de aplicação uma das outras razões do sucesso do PZT está relacionado com a facilidade de alteração da resposta elétrica através de dopantes; composições de PZT na região morfotrópica podem ser “duras” ou “macias”<sup>18, 20</sup>. Os materiais duros geralmente exibem baixa permissividade dielétrica e perdas enquanto que o campo coercivo e fator de qualidade mecânica são elevados quando comparados com os com materiais macios. Além disso, a temperatura de Curie ( $T_c$ ) alta permite excelente estabilidade térmica do PZT e a sua utilização a temperaturas operacionais de cerca de 175 °C. Geralmente, os materiais duros são comercialmente utilizados para aplicações como limpeza ultrassônica, transdutores, sonares, terapia médica e soldagem ultrassônica, enquanto que os materiais macios são usados para sensores, atuadores, recetores de geradores de baixa potência, hidrófones, giroscópios, acelerômetros, impressoras a jato de tinta e bimorfos. Para informações detalhadas sobre propriedades e aplicações de materiais piezoelétricos

comercialmente disponíveis, as páginas da Web de fabricantes comerciais como Morgan Electroceramics e PI Ceramics são referidas <sup>21,22</sup>

*Tabela 1 - Propriedades elétricas à temperatura ambiente de piezoelétricos de perovskite à base de chumbo <sup>16</sup> (Adaptado).*

Material	Composição	Temperatura de Curie	Constante dielétrica	Coeficiente piezoelétrico (d33)
	x = mole %  PT	°C	1 KHz	pC/N
<b>PMN-PT</b> Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> - PT	33	160	5000	690
<b>PZT 5H</b>  Navy VI – Soft PZT	~48	193	3500	590
<b>PZT-8</b>  Navy III - Hard PZT	~48	300	1000	220
<b>undoped PZT</b> Pb(Zr <sub>0.52</sub> Ti <sub>0.48</sub> )O <sub>3</sub>	48	360	800	220
<b>PZN-PT single crystal</b> Pb(Zn <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub>	8	165	4200	2070
<b>PMN-PT single crystal</b>				

Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> -PT	30	150	2890	730
PMN-PT single crystal Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> - PT	35	160	3100	1240

Apesar do elevado desempenho eletromecânico dos materiais à base de PZT, a presença de chumbo pode apresentar variados perigos para a saúde humana e para o meio ambiente, e como tal procura-se atualmente a sua substituição. Um dos materiais mais promissores na substituição do PZT é o niobato de potássio e sódio K<sub>x</sub>Na<sub>1-x</sub>NbO<sub>3</sub> (KNN). Existem vários estudos em curso com o intuito de viabilizar essa substituição <sup>16</sup>.

### 2.2.2. Efeito piezoelétrico direto, inverso e coeficientes piezoelétricos

Identificam-se dos tipos de efeitos piezoelétricos: o efeito direto e o efeito inverso. Quando o material piezoelétrico é sujeito a uma tensão ou deformação mecânica, este tem a capacidade de gerar uma densidade de carga. Neste caso estamos perante o efeito piezoelétrico direto.

A relação linear existente entre uma tensão  $X_{jk}$  aplicada a um material piezoelétrico e a resultante densidade de carga é dada pela equação 10:

$$D_i = d_{ijk} X_{jk} \left[ \frac{C}{m^2} \right] \quad (Eq. 10)$$

onde  $d_{ijk}$  é o coeficiente piezoelétrico [C/N]. O coeficiente é assim um tensor de ordem 3 a que correspondem 3<sup>3</sup> elementos <sup>23</sup>.

Por outro lado uma das características dos materiais piezoelétricos é o facto de poderem também expandir ou contrair quando lhes é aplicado um campo elétrico. Este efeito, chamado de efeito de conversão piezoelétrica inverso, está descrito na equação 11.

$$x_{ij} = d_{ijk}^t E_k \left[ \frac{m}{V} \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

$x_{ij}$  é denominado de coeficiente de conversão piezoelétrica e  $t$  denota a matriz inversa <sup>11</sup>.

A Figura 24 esquematiza os dois efeitos piezoelétricos referidos.

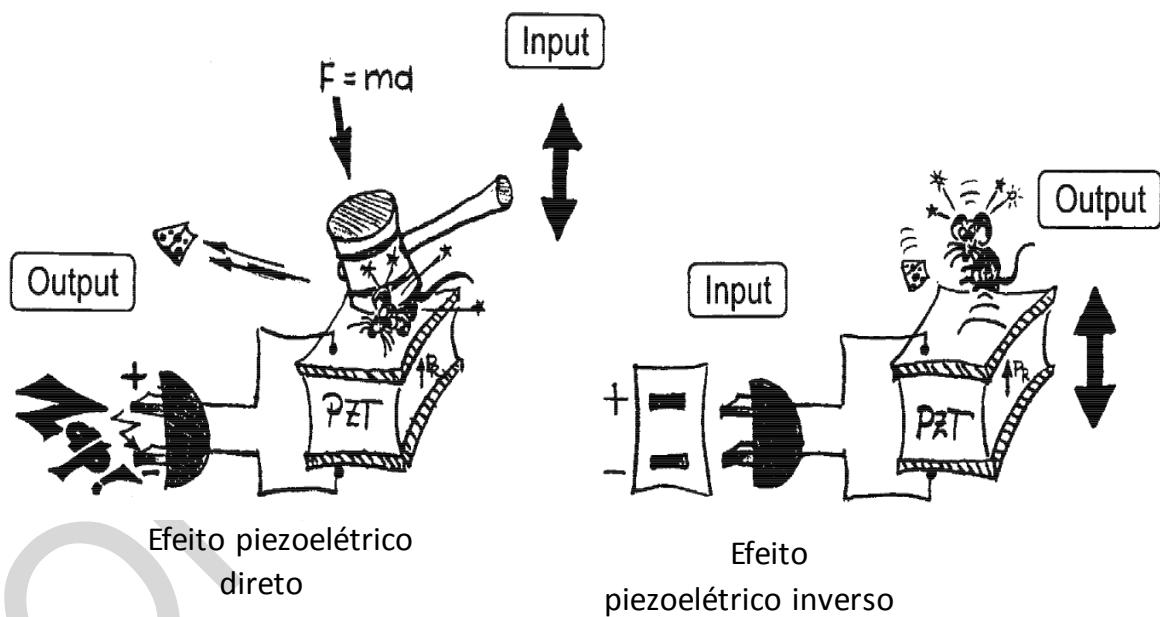


Figura 24 - Esquematização dos efeitos piezoelétricos direto e inverso <sup>16</sup>.

Os coeficientes piezoelétricos que qualificam os efeitos piezoelétricos direto e inverso são termodinamicamente idênticos. Normalmente, um coeficiente piezoelétrico que é medido na direção do campo elétrico aplicado é chamado de longitudinal e um coeficiente piezoelétrico que é medido na perpendicular ao campo é chamado de transversal. Os restantes são chamados de coeficientes de corte.

Fazendo uso das propriedades de simetria de um cristal é possível reduzir o número de constantes independentes dos coeficientes  $d_{ij}$  de vinte e sete para dezoito <sup>23</sup>.

Para isso é necessário escrever os tensores piezoelétricos na forma matricial com as seguintes substituições <sup>23</sup>:

$$i11 \Rightarrow i1; \quad i23, i32 \Rightarrow i4;$$

$$i22 \Rightarrow i2; \quad i13, i31 \Rightarrow i5;$$

$$i33 \Rightarrow i3; \quad i12, i21 \Rightarrow i6;$$

Fazendo-se estas alterações é possível substituírem-se as equações 10 e 11 pelas equações 12 e 13, respetivamente.

$$D_i = d_{ij} X_j \left[ \frac{C}{m^2} \right] \quad (Eq. 12)$$

$$x_j = d_{ij} E_i \left[ \frac{m}{V} \right] \quad (Eq. 13)$$

Neste caso o índice  $i$  refere-se à direção de aplicação do estímulo e o índice  $j$  à direção da resposta do sistema. Cada eixo cartesiano tem um algarismo associado: eixo das abcissas: 1; eixo das ordenadas: 2; eixo das cotas: 3; Por conseguinte, se nos referirmos ao efeito piezoelétrico direto o índice  $i$  indica-nos a direção da polarização do material e o  $j$  a direção de aplicação da tensão mecânica a esse mesmo material. Se por outro lado estivermos a falar do efeito piezoelétrico inverso o índice  $i$  é referente à direção do campo elétrico a que o material sujeito e o índice  $j$  indica a direção da resposta mecânica do piezoelétrico. A Figura 25 ilustra de forma esquemática a correspondência e relação entre índices.



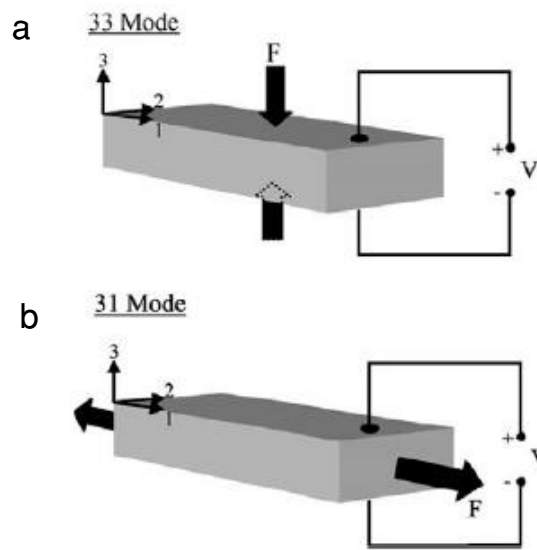


Figura 25 - Representação esquemática do efeito piezoelétrico inverso em modo 33 a) e em 31 b) <sup>13</sup>.

No modo 33 em que  $i$  e  $j$  assumem ambos o valor 3 o material é sujeito a um campo elétrico paralelo ao eixo 3 e a força que resulta da sua deformação mecânica é também ela paralela ao eixo 3.

Na Figura 25 b) pode observar-se um material piezoelétrico a operar em modo 31. Neste caso o índice  $i$  toma o valor 3 e o índice  $j$  é igual a 1. Isto significa que o material é sujeito a um campo elétrico paralelo ao eixo 3 e a sua resposta mecânica é paralela ao eixo 1.

Os materiais piezoelétricos têm a eles associados algumas figuras de mérito. O factor de acoplamento  $K$  (Eq. 14) <sup>24</sup> é um exemplo disso mesmo.

$$K = \sqrt{\frac{d^2 E_y}{\epsilon}} \quad (Eq. 14)$$

Onde  $d$  é um coeficiente piezoelétrico,  $E_y$  o módulo de Young do material em questão e  $\epsilon$  a sua permitividade dielétrica.

No fundo, esta figura de mérito é uma relação da energia mecânica armazenada e a energia elétrica aplicada e vice-versa.

Existe uma outra figura de mérito denominada de constante de voltagem piezoelétrica  $g$ . Esta figura de mérito é definida pela equação 15.

$$g = \frac{E_k}{X_{jk}} \quad (Eq. 15)$$

Esta figura de mérito é dada então pela razão entre o campo elétrico em circuito aberto e a tensão mecânica  $X_{jk}$  aplicada.

## 2.3. Válvulas com atuadores piezoelétricos

Como dito na secção 2.1, a cada válvula está associado a um atuador. Esse atuador terá de perfazer um determinado curso para que sejam garantidas as condições de funcionamento do dispositivo em questão.

Existem diversas configurações de válvulas que fazem uso de atuadores piezoelétricos.

A maior parte das indústrias que trabalha com válvulas de atuadores piezoelétricos utiliza este tipo de dispositivos por apresentarem uma precisão bastante elevada e uma redução de tamanho e de consumo energético <sup>25</sup>.

Este tipo de válvulas podem ser utilizadas em diversas aplicações como por exemplo sistemas de aquecimento a vapor, canalizações de água, gasodutos, oleodutos, reatores de geração de energia reatores químicos, motores e sistemas de vácuo <sup>26</sup>.

Prevê-se que as válvulas piezoelétricas permitirão o desenvolvimento de uma nova geração de sistemas de energia (motores de combustão interna, turborreatores, geradores de vapor e gás e reatores nucleares). Também os sistemas regulação de fluídos irão ver a sua precisão aumentada e o seu tempo de resposta diminuído com a incorporação deste tipo de válvulas <sup>26</sup>.

Os materiais piezoelétricos apresentam algumas limitações em termos de temperatura de trabalho, diferença de potencial e tensão mecânica a que podem ser sujeitos durante o seu funcionamento. Estas limitações, que dependem da composição do cerâmico em questão, podem causar uma despolarização parcial ou total do material. A formulação de novas composições pode então ser uma das soluções para se conseguir contornar estes obstáculos <sup>27</sup>.

Este tipo de materiais são também caracterizados por apresentarem variações de dimensões muito pequenas mas precisas. A título exemplificativo, um piezoelétrico

monolítico com um comprimento  $x$  e um deslocamento (no modo 33) de  $\Delta x$  como se pode observar na Figura 26, terá uma relação entre estas duas grandezas que pode ser observada na equação 16.

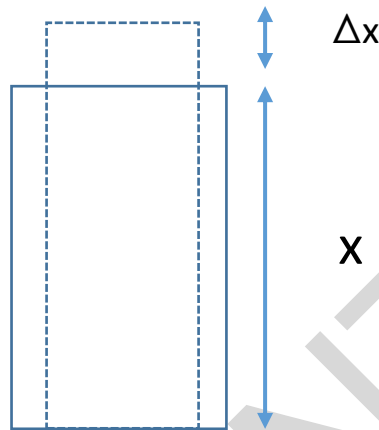


Figura 26 - Representação esquemática do deslocamento  $\Delta x$  de um stack piezoelétrico com comprimento  $x$ .

$$\frac{\Delta x}{x} = 0.1\% \text{ a } 0.3\% \quad (Eq. 16)$$

Portanto, com um monolítico de 10mm de comprimento apenas conseguimos deslocamentos na ordem dos 10  $\mu\text{m}$ .

Associada à variação de dimensões é gerada uma força que é característica do piezoelétrico. A equação 17 permite-nos calcular a força máxima  $F_{\text{max}}$  que um atuador piezoelétrico com uma determinada rigidez  $K_T$  [N/m] e um deslocamento  $\Delta x$  pode gerar

28.

$$F_{\text{max}} = K_T \cdot \Delta x \quad (Eq. 17)$$

Em certas aplicações o movimento do atuador encontra-se restringido por uma mola de constante  $K_{\text{mola}}$  [N/m] que, como dito anteriormente, garante o correto regresso do atuador ao seu ponto de offset. Neste caso a força máxima que o atuador pode gerar é aproximadamente calculada com base na equação 18 <sup>28</sup>.

$$F_{max} \approx K_T \cdot \Delta x \cdot \left(1 - \frac{K_T}{K_T + K_{mola}}\right) \quad (Eq. 18)$$

Existe uma relação entre a referida força e o deslocamento do piezoelétrico ( $\Delta x$ ). A Figura 27 demonstra essa relação.

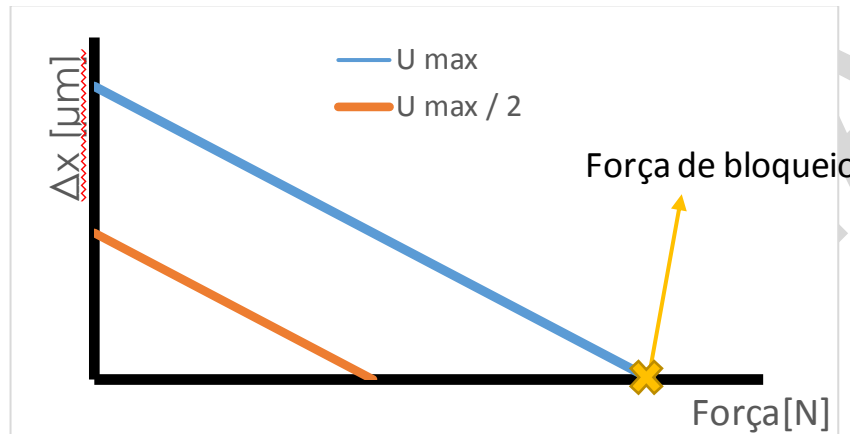


Figura 27 - Diagrama de força e deslocamento de um atuador piezoelétrico com determinadas dimensões <sup>29</sup>.

Para uma dada diferença de potencial  $U$  aplicada ao material, a força que ele consegue exercer decresce linearmente com o aumento do seu deslocamento. Pode então dizer-se que materiais que apresentam deslocamentos mais elevados têm a eles associado uma menor capacidade de gerar força.

Quando o campo elétrico a que o material está sujeito é alterado a curva  $\Delta x$  vs força é deslocada de acordo com que se pode observar na Figura 27.

A força associada ao dispositivo piezoelétrico quando este não apresenta nenhum deslocamento é chamada de força de bloqueio e pode ser observada na Figura 27 <sup>29</sup>.

Na prática são utilizadas como atuadores configurações ou dispositivos piezoelétricos que, para além do cerâmico, são também compostos por outros materiais e apresentam um desenho que se adapte às especificações da sua utilização <sup>29</sup>.

Diferentes configurações piezoelétricas apresentam diferentes ordens de grandeza de deslocamentos e forças de bloqueio.

Os atuadores com cerâmicos piezoelétricos podem ser divididos em quatro grandes grupos: os unimorfos, os bender bimorfos e trimorfos, os atuadores multicamada e os atuadores com deslocamentos mecanicamente amplificados.

### 2.3.1. Atuadores unimorfos e bimorfos

Um unimorfo é constituído por uma placa de um material piezoelétrico colada a uma placa de um material inativo <sup>29</sup>.

Um piezoelétrico bimorfo é constituído por duas finas placas piezoelétricas polarizadas e coladas juntas. É aplicada uma diferença de potencial sobre uma delas que irá expandir na direção da sua espessura ou seja, segundo o modo 33. Ao expandir numa das direções irá contrair nas outras duas perpendiculares ao plano o que irá originar uma deflexão da montagem bimorfa <sup>29</sup>. Pode então dizer-se que neste caso o atuador opera no modo 31. De referir a necessidade da existência de elétrodos no topo, no centro e na parte inferior do atuador.

Quando as duas placas são polarizadas na mesma direção o bimorfo é classificado como sendo em paralelo e quando são polarizadas em direções opostas é dito que é em série <sup>29</sup>.

A Figura 28 ilustra o modo de atuação de um atuador bender em série com  $L$  comprimento,  $T$  espessura,  $W$  largura, um deslocamento de  $\Delta x$  uma diferença de potencial aplicada de  $V_{out}$  e com a capacidade exercer uma força de  $F_{in}$ .

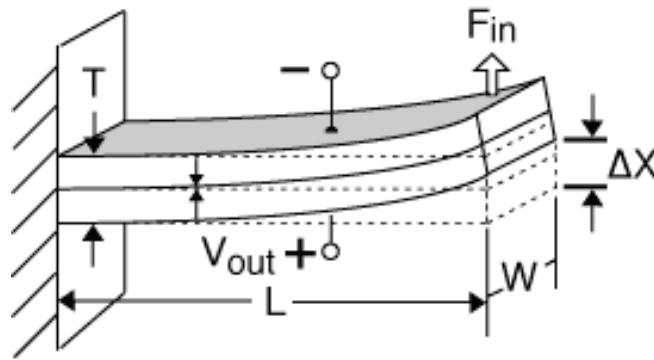


Figura 28 - Modo de atuação de um atuador bender bimorfo <sup>30</sup>.

O bimorfo pode ser reforçado com a incorporação de uma terceira placa de fibra de vidro ou de carbono entre as duas chapas piezoelétricas. Neste caso a montagem passa a ser denominada de trimorfa. Este reforço pode também ser feito com um maior número de camadas piezoelétricas funcionais, o que melhorará as propriedades do atuador (como por exemplo o seu deslocamento) mas também irá aumentar o custo a ele associado <sup>29</sup>.

Os atuadores do tipo bender pertencem a um grupo de dispositivos denominados de flexíveis. Uma outra configuração que se enquadra nesta classificação são os discos.

Os discos piezoelétricos são atuadores flexíveis que apresentam uma configuração circular.

Na tabela 2 apresentam-se algumas propriedades de atuadores piezoelétricos flexíveis como sejam o seu coeficiente piezoelétrico  $d_{31}$ , a diferença de potencial de operação  $V$ , a sua força de bloqueio  $F_{bl}$  e o seu deslocamento  $\Delta x$ .

Tabela 2 - Propriedades de vários atuadores flexíveis <sup>29</sup>

$L_T$ [mm]	w [mm]	h [mm]	L [mm]	$d_{31}$ [pC/N]	V [V]	$F_{bl}$ [N]	$\Delta x$ [mm]	Obs.
21.5	12	0.6	16.5	215	150	1.31	0.2	50% L
38	6	0.6	33	215	150	0.33	0.82	50 % w
38	12	1.2	33	215	300	2.62	0.41	200% h, 200% U
38	12	0.6	33	215	300	0.65	0.82	Bimorfo
38	12	0.4	33	215	150	0.26	0.60	Unimorfo
38	38	0.4	33	215	150	7.58	0.35	Disco unimorfo
38	12	0.6	33	260	0- 120	2.06	1.63	Bender reforçado

É importante fazer-se a distinção entre  $L$  e  $L_T$ : o primeiro refere-se ao comprimento livre do bender e o segundo ao seu comprimento total do mesmo (incluindo a parte que se encontra fixa e imóvel).

Como se pode observar na tabela 1 os deslocamentos e as forças de bloqueio que os atuadores apresentam são dependentes das suas dimensões. Os maiores deslocamentos são observados em dispositivos benders reforçados com camadas piezoelétricas funcionais.

### 2.3.2. Atuadores multicamada

Os atuadores de multicamada conseguem fornecer forças relativamente elevadas mas apresentam pequenos deslocamentos ou deformações.

Este tipo de atuadores são uma solução que visa a redução da diferença de potencial de operação do piezoelétrico. Um atuador cerâmico monolítico necessita de elevados campos elétricos para que possa operar, na ordem dos 2 [kV/mm]. Com a colocação de elétrodos no seu interior (entre as camadas cerâmicas piezoelétricas) consegue-se diminuir a diferença de potencial necessária para se gerar um determinado campo elétrico. Esta configuração é chamada de stack e pode ser observada uma representação esquemática sua na Figura 29.

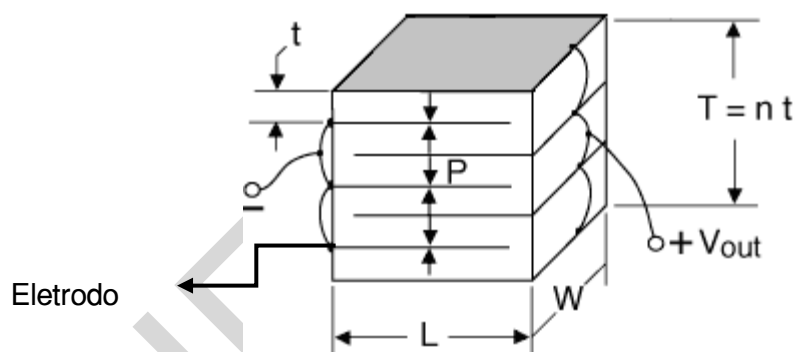


Figura 29 - Representação esquemática de um stack piezoelétrico <sup>30</sup>.

O stack que é apresentado na Figura 29 tem um comprimento  $L$ , uma largura  $W$ . Cada camada entre elétrodos tem uma espessura  $t$  e a espessura de todas as camadas é de  $T$  que é igual ao somatório das espessuras.

Para uma dada diferença de potencial, o campo elétrico a que a camada é sujeita aumenta com a diminuição da sua espessura. Portanto, para que se gere o mesmo valor de campo elétrico é necessário aplicar uma maior diferença de potencial quando as camadas são mais espessas. Os atuadores de alta voltagem (aplicada) têm camadas cerâmicas com espessura que varia entre os 0.4 e 1mm e nos de baixa voltagem a espessura das camadas assume valores 25 e 100  $\mu\text{m}$  <sup>28</sup>.



O deslocamento  $\Delta x$  de um atuador stack piezoelétrico com  $n$  camadas pode e com uma diferença de potencial de operação de  $V$  ser estimado através da equação 19.

$$\Delta x = d_{33} \cdot n \cdot V \quad (Eq. 19)$$

Este tipo de configurações são caracterizadas por apresentarem pequenos deslocamentos (na ordem dos  $\mu\text{m}$ ) mas por outro lado são capazes de gerar forças bastante elevadas (forças de bloqueio na ordem das dezenas de kilo newtons).

### 2.3.3. Sistemas de amplificação mecânica

O desenho dos atuadores piezoelétricos pode ser de tal forma que permita que uma alavanca amplifique o seu deslocamento. A alavanca deve ser bastante rígida e não deve friccionar em nenhum componente do dispositivo <sup>28</sup>.

Devem ser utilizados elementos flexíveis para se fazer a ligação dos componentes deste tipo de configuração.

A Figura 30 é uma representação de um exemplo de amplificação através de uma alavanca do deslocamento de um stack piezoelétrico.

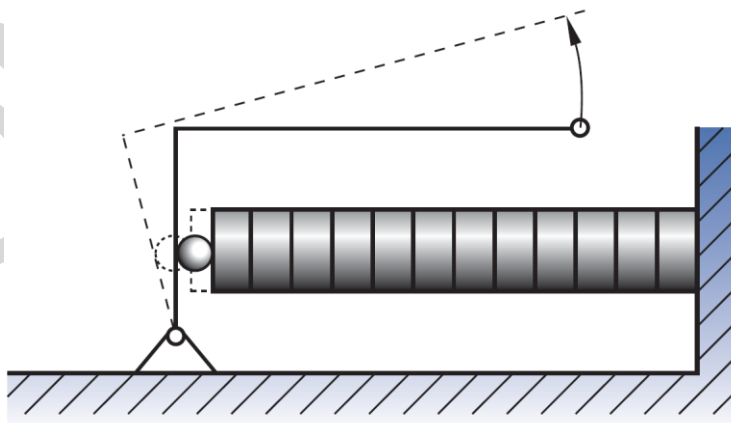


Figura 30 - Amplificação de movimento de uma só alavanca <sup>28</sup>.

Neste sistema de amplificação mecânica o deslocamento a que a haste vertical é sujeita é amplificado no final da configuração através do uso uma alavanca como se pode observar na Figura 30.

Para que se consigam múltiplas amplificações podem ser utilizadas várias alavancas. Cada uma delas irá amplificar o deslocamento da anterior. Na Figura 31 podem observar-se dois tipos de amplificação: com recurso a apenas uma alavanca (a) e com um sistema que combina duas alavancas (b).

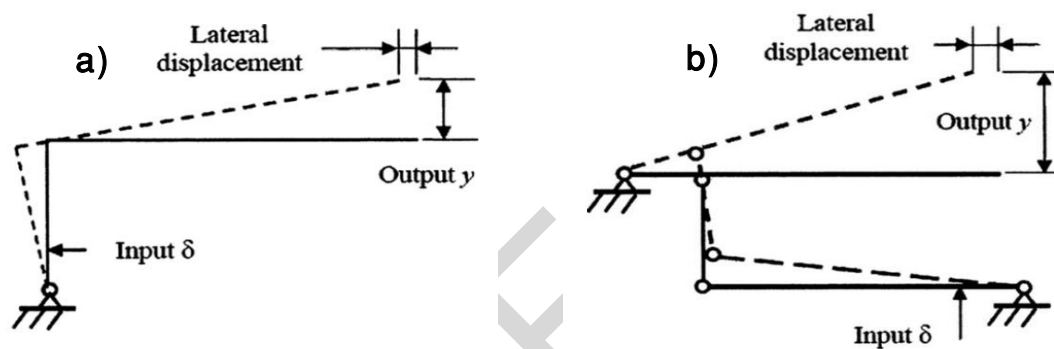


Figura 31 - Sistemas de amplificação de movimento de alavancas: a) simples e b) duplo <sup>31</sup>.

Para um dado input, que neste caso é fornecido por um stack piezoelétrico, o sistema de alavancas gera um output (deslocamento final)  $y$  de tal forma eu  $\delta_{in} < y$ .

Para além do deslocamento vertical é também gerado um deslocamento lateral como se pode observar na Figura anterior. Para se eliminar o deslocamento lateral e se obter um deslocamento ainda superior Ouyang et al. propoem um sistema simétrico de amplificação de 5 alavancas que pode ser observado na Figura 32.

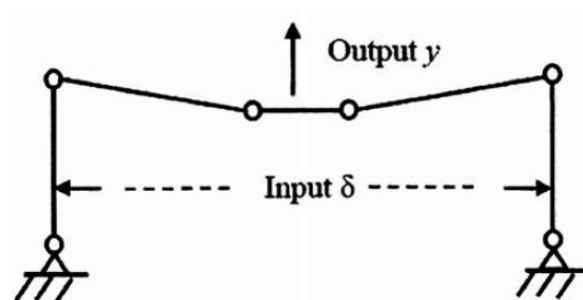


Figura 32 - Sistema simétrico de amplificação mecânica de 5 alavancas <sup>31</sup>.

Podem definir-se algumas variáveis geométricas que serão ponto de partida para o cálculo da amplificação de um determinado input por parte deste tipo de configuração. Essas variáveis encontram-se descritas na Figura 33.

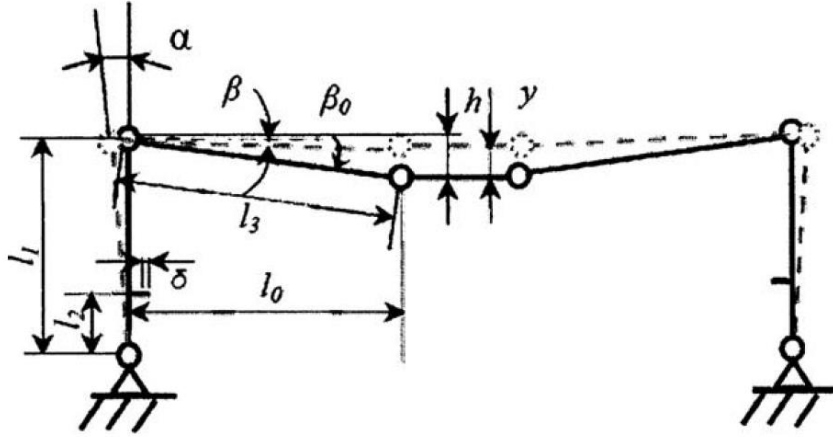


Figura 33 - Dimensões associadas a um sistema simétrico de amplificação mecânica de 5 alavancas<sup>31</sup>.

A equação 20 relaciona todas as dimensões presentes na Figura 33 para se calcular o output  $y$  que um sistema de amplificação deste tipo consegue gerar com um input.

$$y = h - \sqrt{h^2 - \frac{(k\delta_{in} + 2l_0)l_1\delta}{l_2}} \quad (Eq.20)$$

Através da equação 21 pode constar-se que o deslocamento amplificado  $y$  aumenta com o decrescimento da altura inicial de montagem  $h$ <sup>31</sup>.

A título exemplificativo, apresenta-se na Figura 34 um tipo de configuração patenteada uma válvula que utiliza um dispositivo piezoelétrico em configuração de bender.

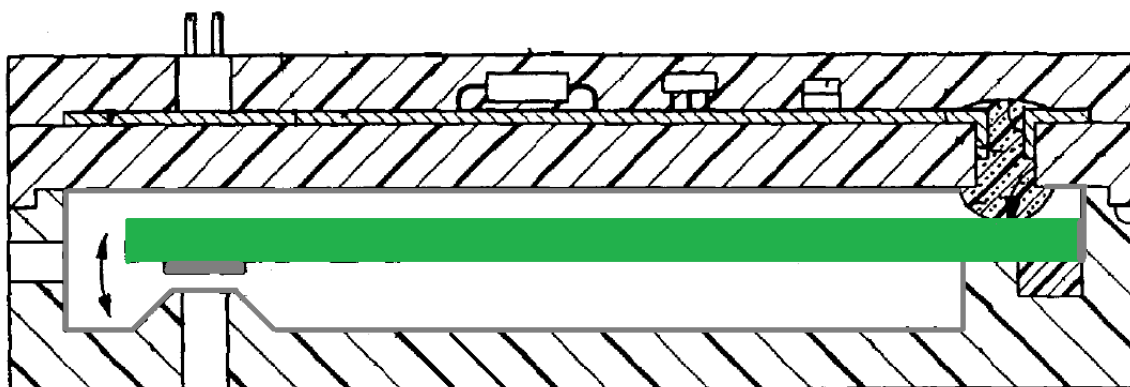


Figura 34 - Válvula com um atuador piezoelétrico do tipo bender <sup>32</sup>.

Na Figura 34 podemos então observar uma válvula com duas passagens de fluido (fig. 34 A e B). Nenhuma destas passagens tem de ser obrigatoriamente utilizada para saída ou entrada de gás. Essa definição é feita de acordo com as necessidades requeridas pela aplicação em questão.

A verde pode observar-se o atuador bender (Figura. 34 C). A alimentação de energia é feita através de D. Esta válvula possui uma configuração normalmente aberta, portanto quando o piezoelétrico é ativo flete em direção a B e obstruí a passagem do fluido. Quando deixa de ser sujeito a um campo elétrico, o atuador volta à sua posição de repouso permitindo novamente a passagem do fluido através do canal B.

CONFIDENTIAL

# **3. Propostas de soluções para válvulas piezoelétricas**

## **Proposta de soluções para válvulas acionadas por atuadores piezoelétricos**

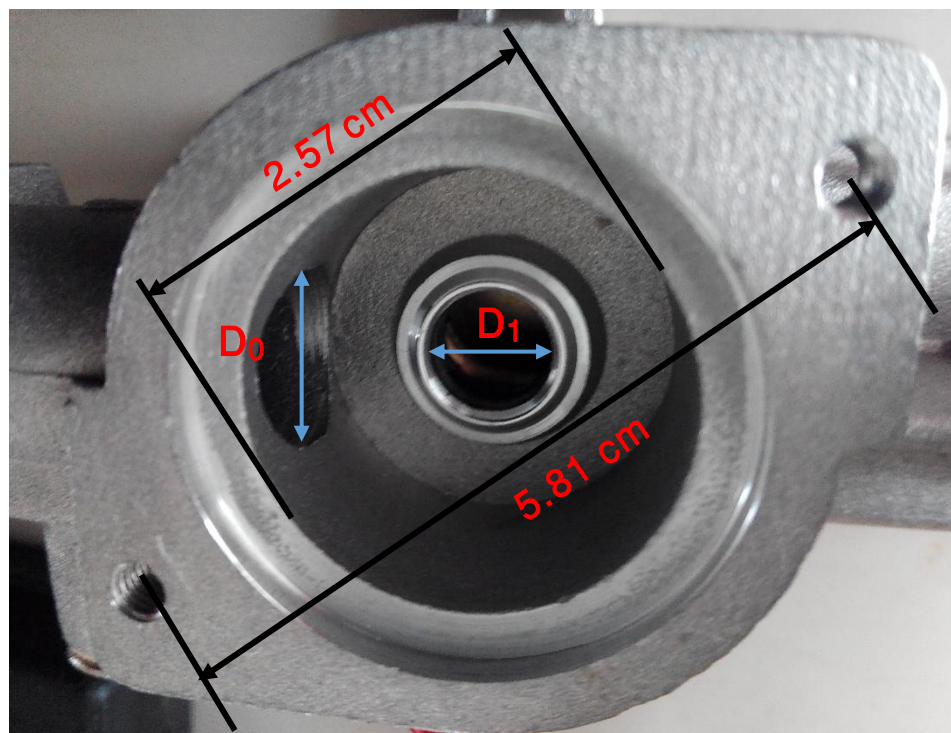
Como referido, o presente trabalho tem como principal objetivo explorar a possibilidade de substituir algumas das atuais válvulas de solenoide em uso na BOSCH (macroválvula e microválvula) por válvulas com atuadores piezoelétricos.

No capítulo 2, secção 2.1.3, apresentou-se e descreveu-se a macroválvula e a microválvula. São válvulas distintas, com características e dimensões diferentes e que, por estas razões, necessitam de soluções diferentes no que diz respeito ao atuador piezoelétrico.

Nas secções que se seguem apresentam-se propostas para atuadores piezoelétricos para ambas as válvulas. No contexto do presente estudo, a solução para a microválvula será alvo de análise mais detalhada e aprofundada.

### **3.1. Proposta de atuador para a macroválvula**

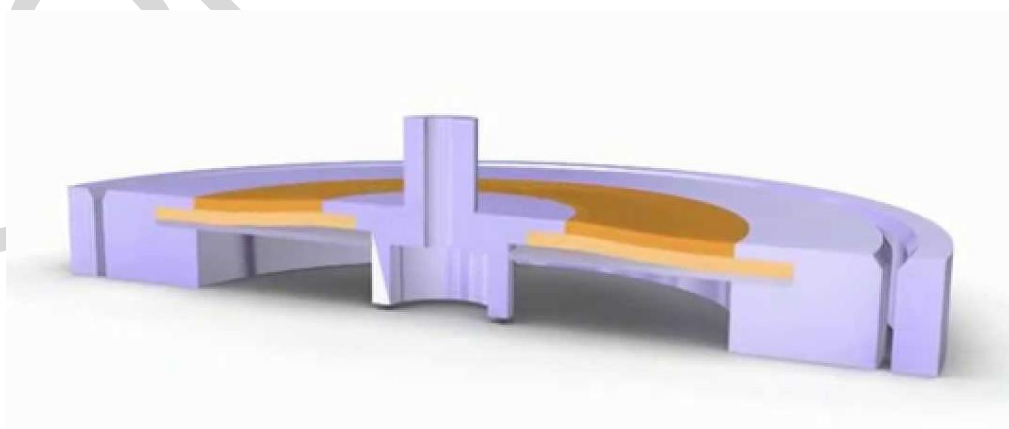
A solução que se propõe para a macroválvula passa pela incorporação de um atuador com uma configuração em disco. O desenho atual da válvula (Figura 35) sugere facilidade de acoplamento de um atuador deste tipo à válvula.



*Figura 35 - Suporte da macroválvula, evidenciando os orifícios de entra e saída de gás com diâmetros  $D_0$  e  $D_1$  respectivamente e a sede (com diâmetro 2,75mm) da atual macroválvula utilizada pela BOSCH.*

Existem no mercado atuadores do tipo disco disponíveis. Como ilustra a Figura 35, a macroválvula tem dimensões apropriadas para aceitar a montagem e acoplamento de actuadores disco.

Na Figura 36 pode ser observado em esquema em corte de um atuador em forma de disco.



*Figura 36 - Esquema representativo de um atuador em configuração de disco <sup>21</sup>.*



Esta configuração de atuadores piezoelétricos é classificada como flexível. É um bimorfo e atua sob a mesma forma que um bender (uma placa contrai e a outra expande). Assim sendo e ao fletir em todo o seu perímetro central (como se observa na Figura 36), um atuador de disco tem a capacidade de mover verticalmente um êmbolo que seja acoplado no seu centro.

O deslocamento apresentado por este tipo de atuadores é geralmente inferior ao requerido para presente desenho da macroválvula. Assim sendo, para que se mantenham as condições de operação da mesma, seria necessário fazerem-se alterações a algumas das suas dimensões nomeadamente aos orifícios de passagem do gás.

## 2.2. Proposta de atuador para a microválvula

A microválvula, pelo seu desenho e características, sugere a utilização de um atuador diferente do proposto para a macroválvula. Na microválvula, atuador encontra-se acoplado a uma alavanca (ver Figura 16) que, com o auxílio de placas ferrosas e um solenoide, faz com que este se mova e apresente um deslocamento de 1 mm.

A microválvula em análise tem um comportamento de válvula normalmente fechada (na ausência de campo elétrico aplicado mantêm-se em posição fechada). A solução mais adequada para este tipo de válvula é um atuador do tipo *bender*, porque o seu deslocamento se aproxima do deslocamento do atual atuador. Para além disso, as suas dimensões o seu modo de flexão são adaptáveis à atual configuração da microválvula normalmente fechada.

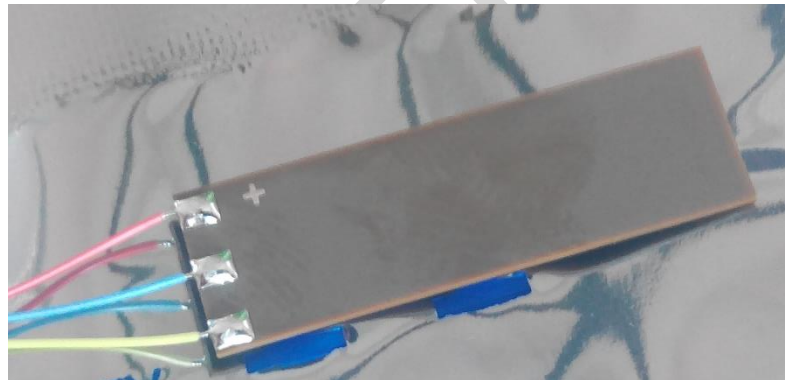
Serão testados dois benders, o bender 1 e o bender 2. Na tabela 3 apresentam-se as características de cada um deles,

*Tabela 3 - Características dos atuadores com configuração bender.*

	Diferença de potencial recomendada <sup>1</sup> [V]	Deslocamento [mm]	Comprimento total [mm]	Espessura [mm]	Largura [mm]
Bender 1	0 a 60	$\pm 0.45$	31	0,67	9.6
Bender 2	0 a 60	$\pm 1$	45	0,55	11

A estes benders está também associada uma temperatura de funcionamento que encontra entre os 0 e os 85°.

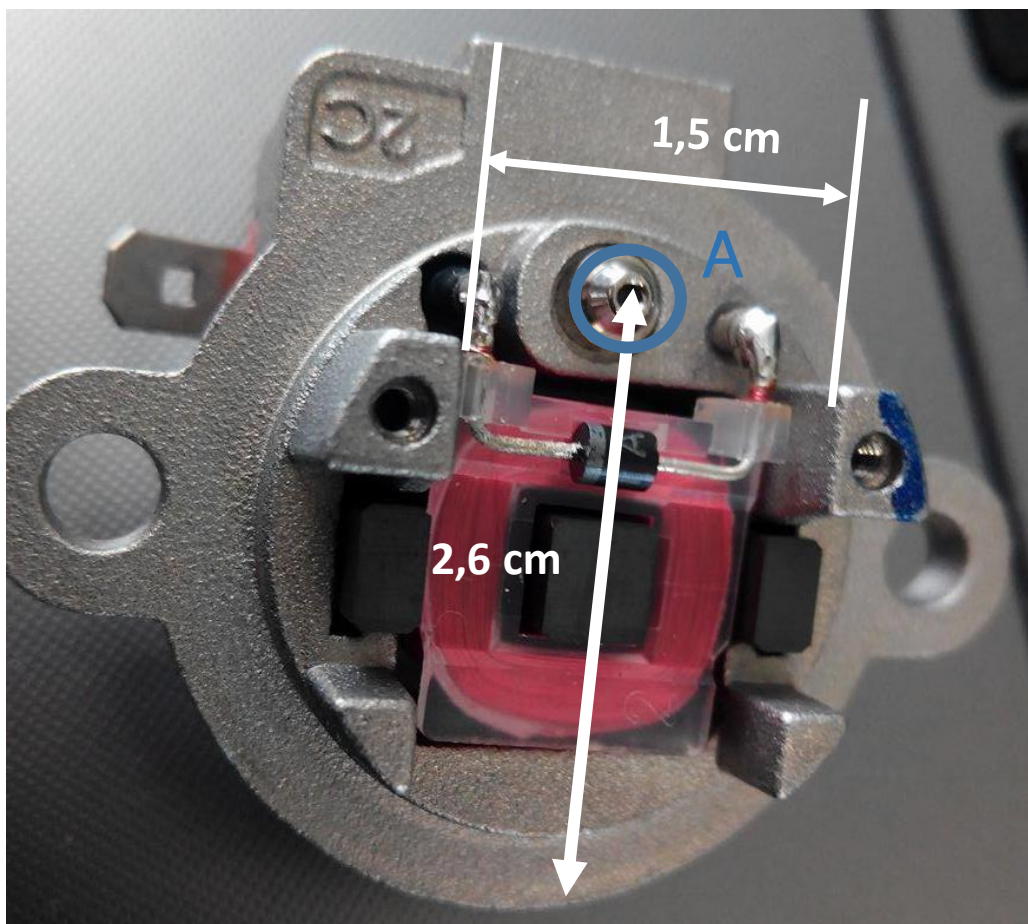
Devido às suas dimensões será incorporado o bender 1 na microválvula. Este bender pode ser observado na figura 37.



*Figura 37 – Bender a incorporar na microválvula, bender 1.*

As dimensões dos atuadores comercialmente disponíveis apresentados na tabela 3 não estão exatamente alinhadas com as que caracterizam as microválvulas atuais. Na Figura 38 podem identificar-se os valores de alguns parâmetros dimensionais das microválvulas atuais com configuração normalmente fechada (para facilitar a compreensão da imagem não se incluiu o atuador).

<sup>1</sup> Valores recomendados na literatura para ativação deste tipo de benders <sup>29</sup>.



*Figura 38 – Dimensões atuais das microválvulas normalmente fechadas (na imagem não está presente o atuador). Os valores das distâncias assinaladas na figura estão expressos em cm. O orifício de passagem gás encontra-se também legendado A).*

Da análise da Figura 38 facilmente se constata que há um desajuste entre 3,1cm de comprimento total do bender e os 2,6cm de espaço disponível na válvula.

Para que a incorporação de um destes atuadores bender na microválvula assegure a sua funcionalidade no contexto do dispositivo DV-2, é pois necessário introduzir pequenas alterações no desenho da microválvula atual, compatibilizando assim geometrias de atuador e válvula.

Nenhuma das soluções aqui apresentadas é de circuito fechado, ou seja, uma solução incorporada numa cadeia de controlo com feedback negativo. Um atuador de circuito fechado possui um sensor que monitoriza o seu posicionamento em tempo real e envia a informação de posição a um controlador que envia as necessárias correções

ao sistema de atuação. Deste modo garante-se que o deslocamento do atuador é exatamente aquele que se pretende <sup>33</sup>.

Como os atuadores propostos são de circuito aberto, existem alguns problemas a eles associados como sejam a sua histerese de deslocamento e o comportamento de *drift* ou de *creep* que o deslocamento apresenta quando o atuador é sujeito a ativações sucessivas. Os comportamentos de drift e creep referem-se a uma alteração do deslocamento do atuador (para uma dada diferença de potencial) ao longo do tempo de ativação. O comportamento histerético do deslocamento reflete os efeitos de polarização já discutidos na secção 2.4, Figura 21. Na Figura 39 apresentam-se curvas de histerese de um atuador piezoelétrico de circuito aberto com várias diferenças de potencial aplicadas máximas.

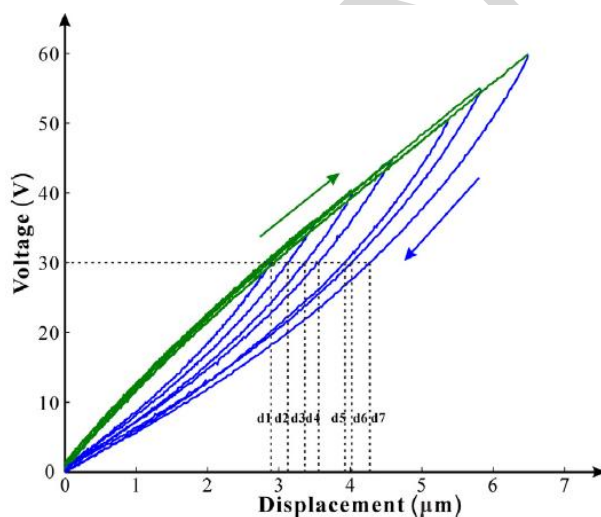


Figura 39 – Curvas de histerese de um atuador de circuito aberto a diferentes picos de tensão <sup>34</sup>.

A cada curva associa-se um máximo de diferença de potencial que corresponde ao ponto de inversão da curva. O formato da curva varia com o deslocamento do atuador.

Existem várias formas de se representar a alteração no deslocamento do atuador a uma dada diferença de potencial. Dependendo do tipo de aplicação, o atuador pode ser sujeito a uma tensão constante durante um determinado período de tempo (monitorizando-se em continuo o seu deslocamento) ou, em alternativa, ser sujeito a ativações periódicas e, a cada ativação, ser feito o registo do seu deslocamento máximo.

O *creep* na curva deslocamento, à semelhança do que se observa na histerese, só acontece em atuadores de circuito aberto. A Figura 40 ilustra o comportamento de *creep* de um atuador piezoelétrico. Neste caso quer-se que o deslocamento do atuador se mantenha nos 60 $\mu\text{m}$ .

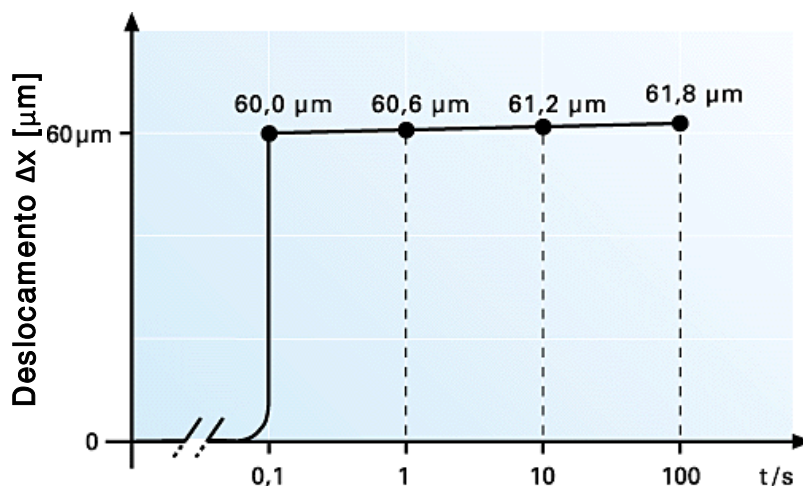


Figura 40 – Aumento do deslocamento do atuador piezoelétrico em circuito aberto após um deslocamento de 60  $\mu\text{m}$  em função do tempo <sup>35</sup>.

O comportamento observado na Figura anterior está relacionado com a polarização remanescente do atuador cerâmico.

Se a tensão aplicada ao atuador for alterada, após a conclusão dessa mudança (por exemplo dos 0 para o 20V) a polarização do material continuar a aumentar ao longo do tempo devido à reorganização lenta dos domínios. Assim se justifica o comportamento de *creep*: como a polarização do material é crescente o deslocamento do atuador também o será.

Na Figura 41 ilustra-se um *drift* no deslocamento do atuador. A cada curva corresponde uma determinada diferença de potencial aplicada.

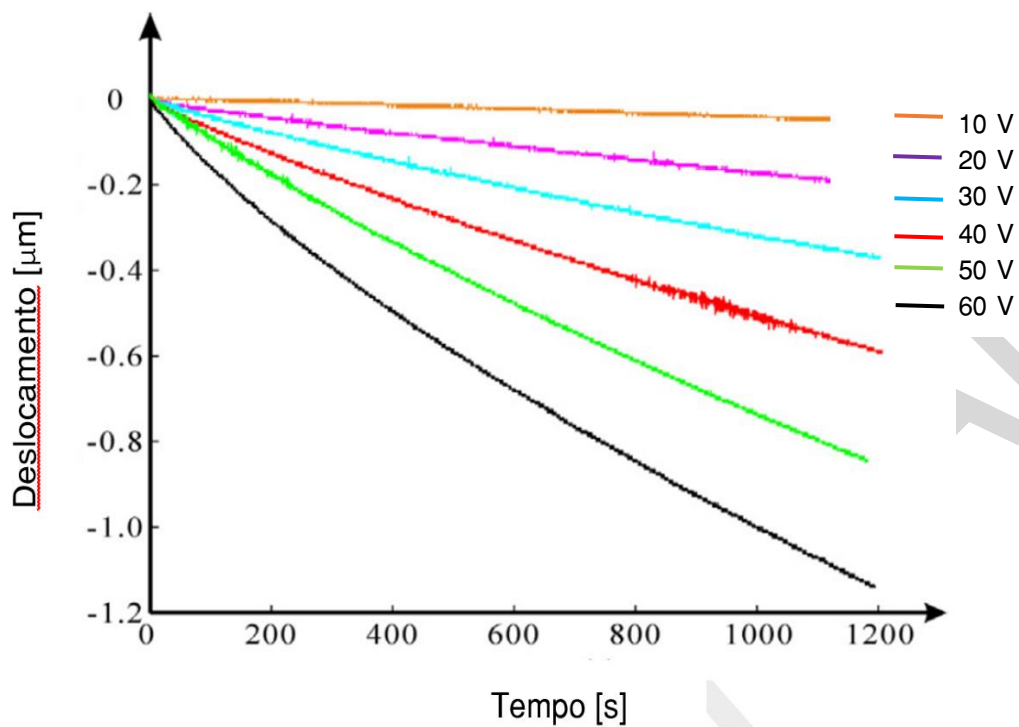


Figura 41 – Drift do deslocamento de um atuador piezoelétrico <sup>34</sup>.

Com o passar do tempo o deslocamento do atuador (sob a ação de uma diferença de potencial constante) decresce. Tal decréscimo está relacionado com as perdas de energia que o atuador pode sofrer, a chamada *leakage current* ou corrente de fuga que reflete o facto de o material piezoelétrico não ser isolador ideal<sup>34</sup>.

CONFIDENTIAL

# **4. Ensaios**

## **Experimentais e Cálculos**



## Ensaaios experimentais e cálculos

No presente capítulo descrever-se-ão as condições de escoamento na microválvula, na sua configuração atual (com atuador solenoide) (microválvula solenoide) e na configuração piezo (com atuador piezoelétrico) (microválvula piezoelétrica) visando obter informação sobre as relações entre queda de pressão e caudal de gás em circulação nos dois *modus operandi* da válvula, i.e. com atuador solenoide e com atuador piezoelétrico. Esta informação é da maior relevância na medida em que se pretende que a solução de atuador piezo garanta tanto quanto possível a manutenção das condições de escoamento do gás (caudal de gás em circulação no circuito das microválvulas) por forma a não comprometer o comportamento do fluxo de gás no circuito principal. Os ensaios de caracterização do escoamento do gás serão descritos em 4.1, para a configuração da microválvula solenóide, e em 4.3 para a configuração da microválvula piezoelétrica.

Nas secções 4.2 apresentar-se-ão os atuadores piezoelétricos *bender* (solução proposta) e descrever-se-ão igualmente os ensaios de caracterização do seu comportamento, designadamente a sua resposta em termos de deslocamento a diferentes diferenças de potencial aplicadas.

Na secção 4.3 descrevem-se também as técnicas usadas para o desenho e fabrico por manufatura aditiva do protótipo de microválvula piezoelétrica para a prova de conceito, i.e. atual microválvula com atuador piezoelétrico. Este será o modelo a usar nos testes com o atuador piezo.

### 4.1 Caracterização do escoamento na microválvula solenóide

Nos testes que a seguir se apresentam foi utilizado o ar como fluido, uma vez que o seu comportamento é equiparável ao do gás utilizado nos esquentadores.

Para se poderem comparar as atuais condições de escoamento do fluido na microválvula solenóide com as que resultam da introdução de um atuador bender, realizaram-se testes à microválvula solenóide em que se avaliou a queda de pressão do ar.

Na Figura 42 pode observar-se o posicionamento das tomas de pressão inseridas no dispositivo DV-2 ( $P_1$  e  $P_2$ ) utilizadas para o referido estudo.

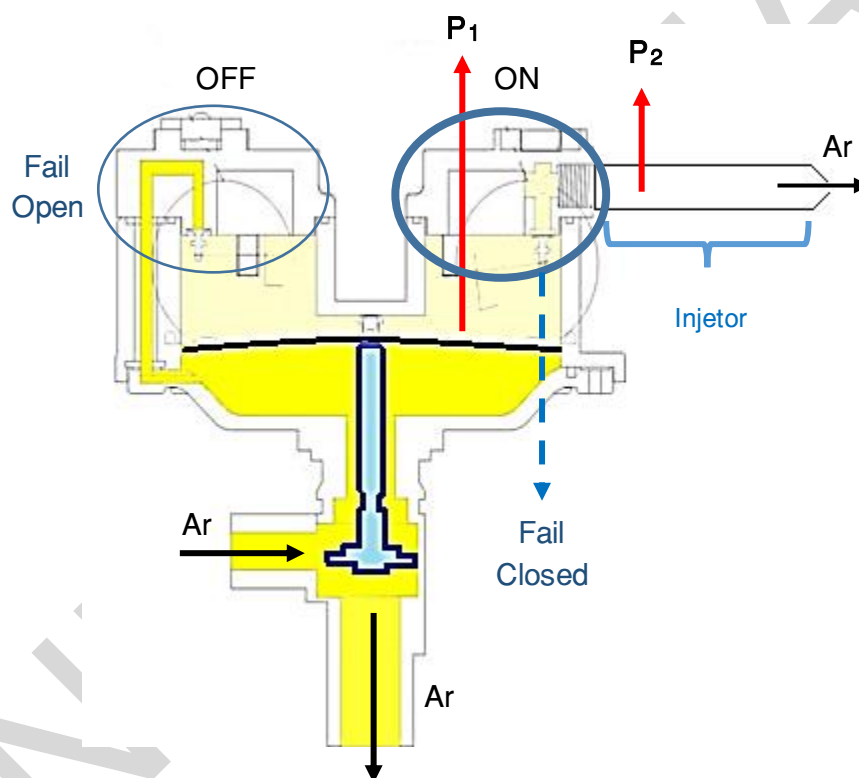


Figura 42 - Esquema representativo do posicionamento das tomas de pressão no dispositivo DV2.

Foram então medidas duas pressões:  $P_1$  e  $P_2$ . A toma de pressão  $P_1$  foi colocada no interior da câmara de armazenamento de fluido (neste caso ar). Para se avaliar a queda de pressão originada pela microválvula FC, a segunda toma de pressão teria de ser colocada a jusante da mesma. Dessa forma, e como se pode observar na Figura 42,  $P_2$  representa os valores de pressão no interior do tubo injetor que se encontra posicionado logo seguir à FC.

O diagrama da Figura representa 43 esquematicamente o posicionamento dos pontos de avaliação de pressão ( $P_1$  e  $P_2$ ) no circuito de escoamento do gás através das microválvulas.

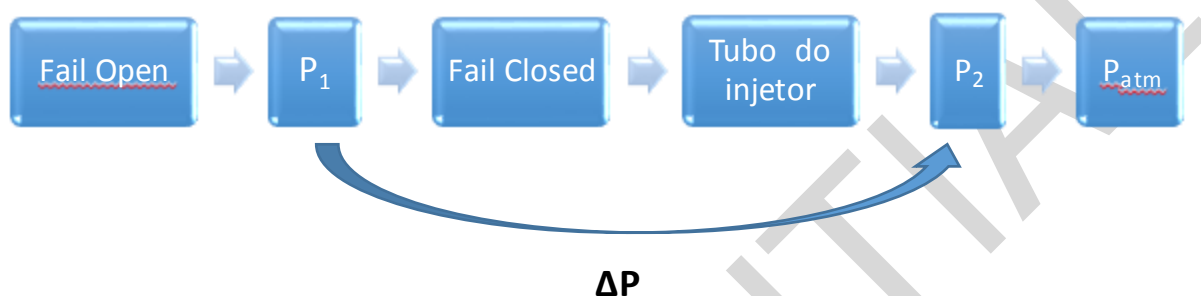


Figura 43 - Diagrama de pressões associadas à montagem experimental da figura 42.

A Figura 44 apresenta o *apparatus* experimental desenvolvido e utilizado para se realizarem as medições de queda de pressão associada à microválvula FC correspondentes às Figuras 42 e 43

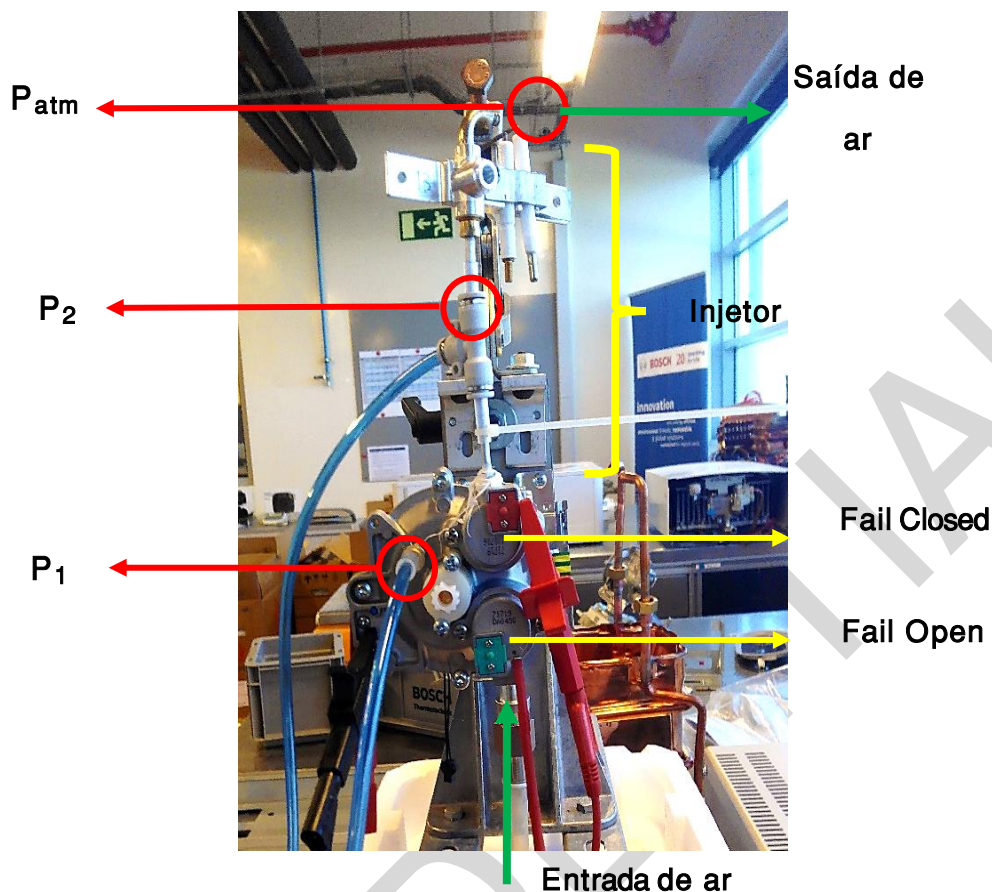


Figura 44 – Apparatus experimental desenvolvido no curso deste trabalho e utilizado para a medição da queda de pressão associada à microválvula solenóide normalmente fechada.

Para se quantificar a queda de pressão associada à passagem do fluído através do orifício da válvula FC realizou-se um teste durante o qual se fez passar ar comprimido através da microválvula solenóide FO até à câmara do dispositivo. Uma vez ativada, a microválvula solenóide FC (ver Figura 42) permite também a passagem do fluído até ao injetor do piloto.

O controlo de  $P_1$  foi feito através de um controlador de caudal *CLESSE* ref. 1437.

Para energizar as microválvulas foi utilizada uma fonte de tensão *EX35ED Dual Power Suplly* de 280W. Para as ativar, as microválvulas foram sujeitas a uma diferença de potencial de 1.6V. Na montagem experimental da Figura 38 assinala-se a existência de uma queda de pressão  $\Delta P$ . Esta queda de pressão ( $\Delta P = P_1 - P_2$ ) está associada à passagem do fluido pelo orifício da microválvula FC.

O orifício da microválvula solenóide tem 1mm de diâmetro e o seu coeficiente de descarga ( $C_D$ ) tem o valor  $C_D = 0.85$ .

Em condições de estado estacionário, o caudal que alimenta o injetor do piloto é igual ao que atravessa a microválvula normalmente fechada. O acesso ao valor desse caudal pode conseguir-se através da equação 21 que relaciona o caudal ( $Q$ ) de um fluido numa conduta com a queda de pressão ( $\Delta P$ ) sofrida por esse mesmo fluido ao passar através duma restrição colocada na conduta, mais especificamente um orifício de uma placa colocada perpendicularmente à direção do fluxo:

$$Q = A_{\text{orifício}} \cdot C_D \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{\text{fluido}}}} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (\text{Eq. 21})$$

sendo  $\rho_{\text{fluido}}$  a densidade do fluido,  $C_D$  e  $A_{\text{orifício}}$ , o coeficiente de descarga do orifício e a área do orifício. O valor de  $\Delta P$  pode ser assim usado para estimar o valor do caudal  $Q$  de gás em circulação.

Por conseguinte, a medição de  $P_1$  e  $P_2$  permite calcular  $\Delta P$  ( $\Delta P = P_1 - P_2$ ) e, com base em diferentes valores de  $\Delta P$ , calcular a variação do caudal com a queda de pressão (Equação 21), assumindo como hipótese de partida que o  $C_d$  do orifício com *bender* é semelhante ao  $C_d$  do orifício com solenóide. Efetuaram-se medidas de queda de pressão, em condições de diferentes valores de pressão  $P_1$ , que variou entre 25 e 50 mbar. As pressões  $P_1$  e  $P_2$  foram medidas com sensores piezo-resistivos.

Na microválvula está presente, como já anteriormente descrito (Figura 16), um atuador que se opõe à passagem do fluido. Quando o atuador se encontra suficientemente

afastado do orifício, a área de passagem do gás é definida pela área da secção reta do orifício  $A_1$  (Figura 45). Por outro lado, se o atuador operar muito próximo do orifício de passagem do gás, a área de passagem do fluido será dada pela área lateral de um cilindro  $A_s$  (Figura 45) com um diâmetro  $D$  igual ao do êmbolo e com uma altura  $\Delta x$  igual à distância entre o plano da área de topo do êmbolo e o plano da entrada do orifício (deslocamento do êmbolo). Na Figura 45 podem ser analisados os desenhos e as equações das áreas acima descritas.

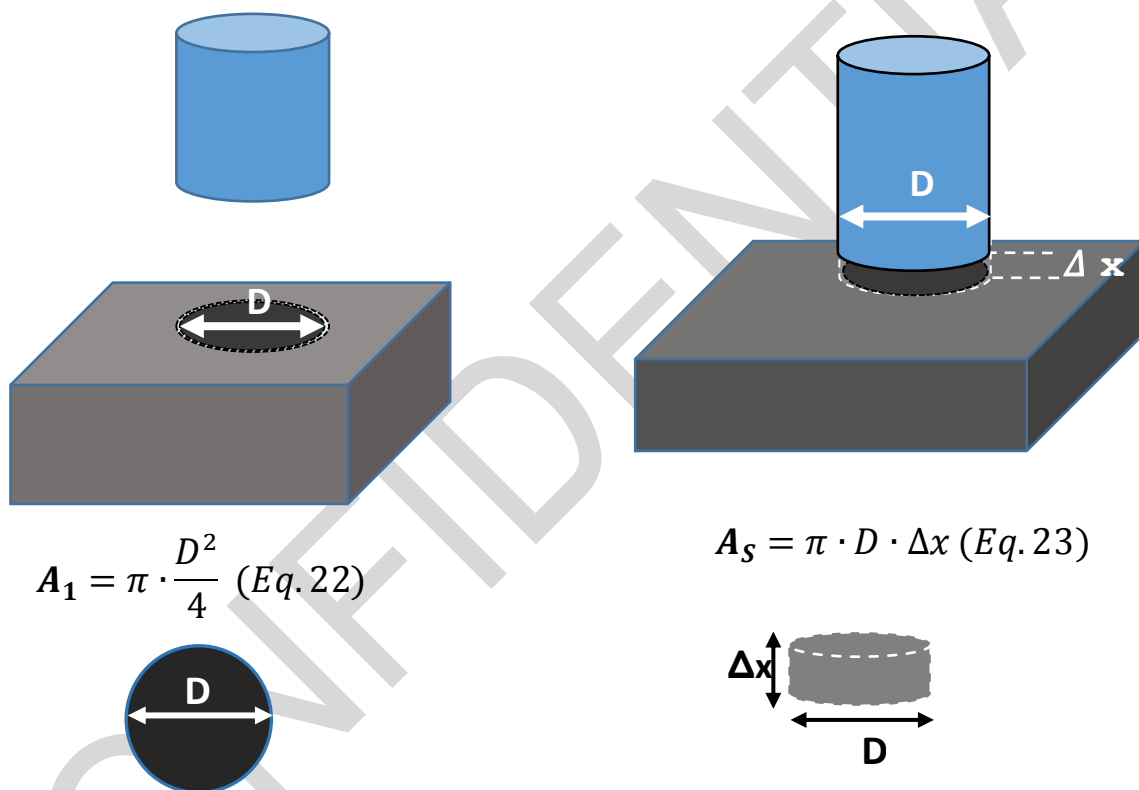


Figura 45 - Representações esquemáticas das áreas  $A_1$  e  $A_s$ . As fórmulas dessas mesmas áreas estão descritas nas equações 22 e 23 (presentes na figura).

Igualando as equações das duas áreas, pode definir-se uma condição limite relativamente ao valor mínimo do afastamento (ou deslocamento)  $\Delta x$  a partir do qual se abandona  $A_s$  e se assume  $A_1$  (eq. 24):

$$A_1 = A_s \leftrightarrow \Delta x = \frac{D}{4} \quad (Eq. 24)$$

Neste contexto, a área de passagem do gás é calculada através de  $A_1$  se o deslocamento do atuador for superior a um quarto do diâmetro do orifício; se o deslocamento do atuador for inferior àquele valor, a área de passagem do gás passará a ser definida por  $A_s$ .

Atendendo a que o atuador deste tipo de válvula perfaz um curso 1mm, sendo o diâmetro do orifício igualmente de 1mm, adota-se neste caso a definição  $A_1$  para cálculo da área de passagem do fluido.

Realizou-se um outro tipo de teste à atual configuração do dispositivo (DV-2) em que se determinou o tempo a partir do qual todo o gás acumulado na câmara que pressiona a membrana (ver Figura 15) é escoado. Para tal fixaram-se vários valores de pressão  $P_1$ : 25, 30, 35, 40, 45 e 50mbar. Quando estes valores estabilizaram, a válvula normalmente aberta (válvula de alimentação do fluido) é ativada e é contabilizado o tempo que  $P_1$  demora a atingir a pressão ambiente.

## 4.2 Atuador para a microválvula normalmente fechada

Atendendo à configuração atual da microválvula FC, acoplar-se-á a este tipo de válvula o atuador ou bender 2. Para efeitos de caracterização testar-se-á igualmente o atuador ou bender 1.

Ambos os atuadores ou *benders* testados são bimorfos. Possuem três elétrodos (no topo, central, e na base) desenhados para aplicação de campo elétrico a cada uma das camadas (Anexo 2) (Figura 46).

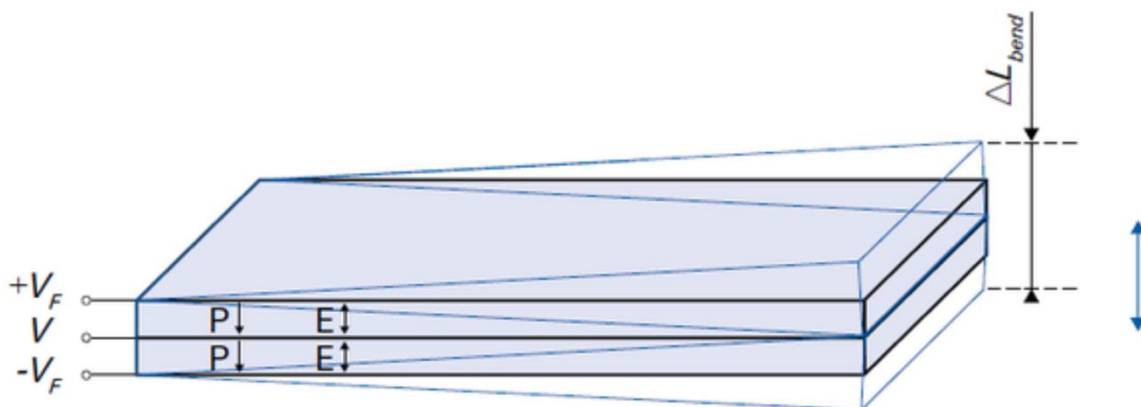


Figura 46 - Bender bimorfo. Pode ser observado o seu deslocamento  $\Delta L_{bend}$ , a direção da sua polarização  $P$  e do campo elétrico  $E$  a que é sujeito. Este bender possui 3 elétrodos ligados a um terminal positivo  $+V_F$ , a um negativo  $-V_F$  e um variável  $V$  <sup>21</sup>.

Como se pode observar, o vetor polarização  $P$  da camada superior do *bender* está orientado do topo para o centro e o da camada inferior do centro para a base. Atendendo a esta configuração de polarização de camadas, pode afirmar-se que os *benders* utilizados possuem uma conexão em paralelo uma vez que as duas camadas são polarizadas na mesma direção e sentido.

Os *benders* em análise vêm acompanhados de uma ficha de caracterização que estabelece o seu deslocamento máximo. Atendendo à importância deste parâmetro, procedeu-se à caracterização do comportamento do *bender*, medindo a variação do deslocamento em função da tensão aplicada.

Laboratorialmente, a medição precisa do deslocamento linear de um atuador piezoelétrico foi efetuada recorrendo a um transformador linear diferencial variável também designado por LVDT (Linear Variable Differential Transformer), aqui utilizado como um sensor de deslocamento.

Nas Figuras 47 podemos observar o *apparatus* experimental utilizado para quantificar o deslocamento dos *benders* em análise (Figura 47 A) e a zona de contacto entre o bender e a vareta do LDVT.



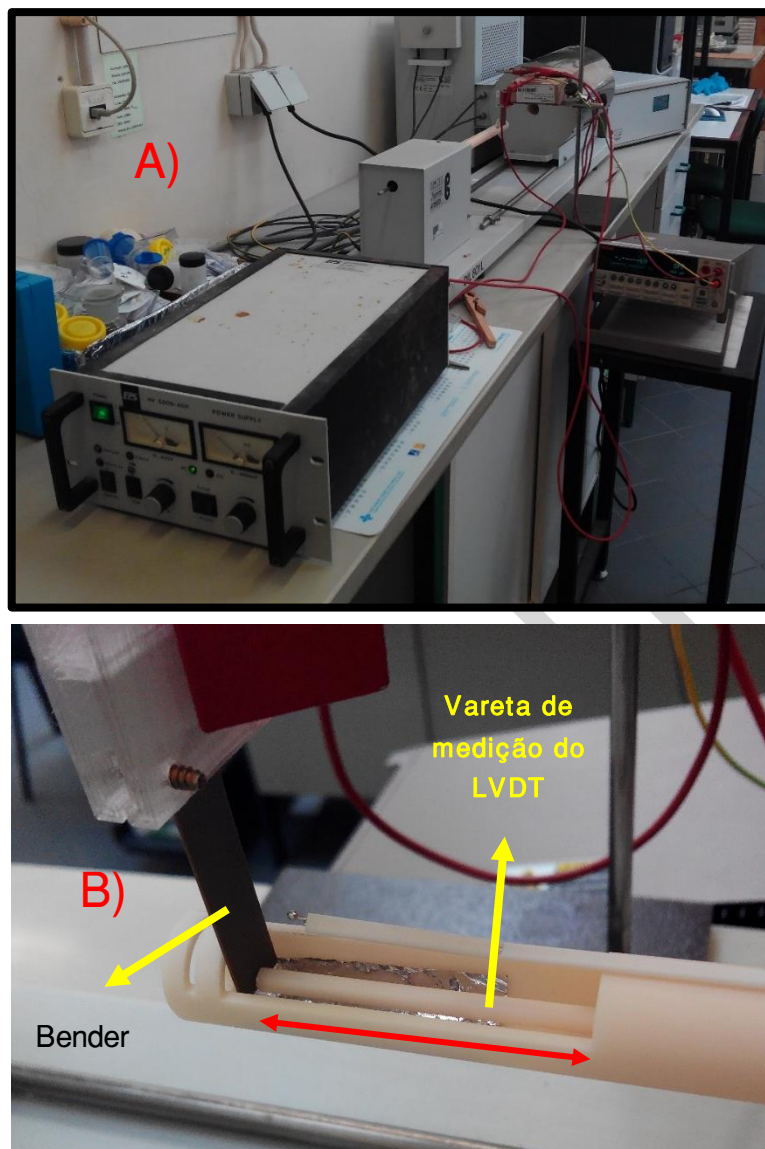


Figura 47 – A) Apparatus experimental baseado no LVDT de um dilatómetro, utilizado na medição dos deslocamentos dos benders e B) Zona de contacto do bender com a vareta do LVDT.

Para ativar eletricamente os benders, utilizaram-se duas fontes de tensão de 60 V (Modelos EPS HV 5006-400 e Keithley 2410 1100V) para impor uma tensão fixa de 60V a uma das camadas do *bender* e uma tensão variável (0 a 60V) à outra camada, respetivamente (Anexo 3).

Mediram-se os deslocamentos dos referidos *benders* quando sujeitos a várias diferenças de potencial, designadamente 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 50V.

### 4.3 Desenho e manufatura aditiva de protótipo para prova de conceito

A fim de provar o conceito e proposta aqui preconizadas, i.e. substituição da atuação por solenóide do êmbolo da microválvula, por atuação induzida por piezoelétrico, fabricou-se, por recurso à manufatura aditiva, um protótipo da microválvula (designadamente a cabeça) à qual se acoplou o *bender* piezoelétrico.

O protótipo fabricado em acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), com dimensões dos orifícios de passagem do fluído iguais às da microválvula solenoide, garante que as condições de escoamento do gás no protótipo da nova válvula reproduzem as condições de operação da microválvula solenóide; deve aqui ser considerado que este estudo pretende testar a adequação da atuação piezoelétrica a válvula solenoide existente, sem recurso ao desenvolvimento de um novo desenho de válvula, de forma a não alterar os atuais sistemas de válvulas, sua localização, etc.

Por recurso à ferramenta SOLID WORKS (2017-2018 *Student edition*) desenhou-se o referido protótipo.

A concretização deste modelo foi conseguida com recurso a impressão de adição manufaturada. Para se garantir a estanquicidade da peça esta foi impressa com *PolyJet*. Este requisito é cumprido devido à qualidade da impressão. Este tipo de impressão utiliza tecnologia semelhante à dos jatos de tinta para imprimir peças sólidas. Os jatos movimentam-se no plano, desenhando camada a camada. O material depositado é um fotopolímero que é posteriormente *curado* sob radiação UV. As peças impressas por esta via apresentam uma resolução bastante elevada dado que a espessura de cada camada não ultrapassa  $16\ \mu\text{m}$ <sup>36</sup>. A espessura da camada é definida pelo deslocamento vertical da plataforma.

Na Figura 49 está esquematizado todo o processo de impressão *polyjet* anteriormente descrito.

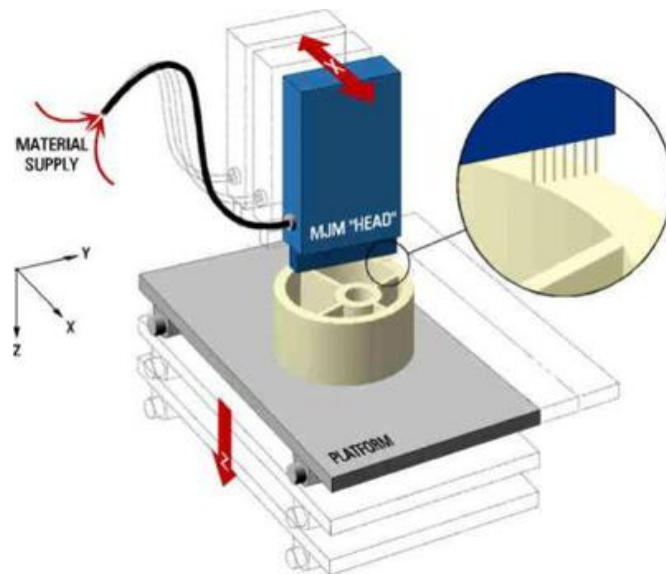


Figura 48 – Representação esquemática da técnica de adição manufaturada polyjet <sup>37</sup>

De forma a testar o protótipo de microválvula piezoelétrica desenvolvido, foram realizadas medidas de queda de pressão e para tal foram colocadas duas tomas de pressão de acordo com o esquematizado na Figura 49.

Para a realização dos referidos testes, o bender foi ativado a várias diferenças de potencial que variaram entre os 0V e os 60V.

A Figura 49 é um esquema representativo da montagem experimental utilizada para testar o protótipo.

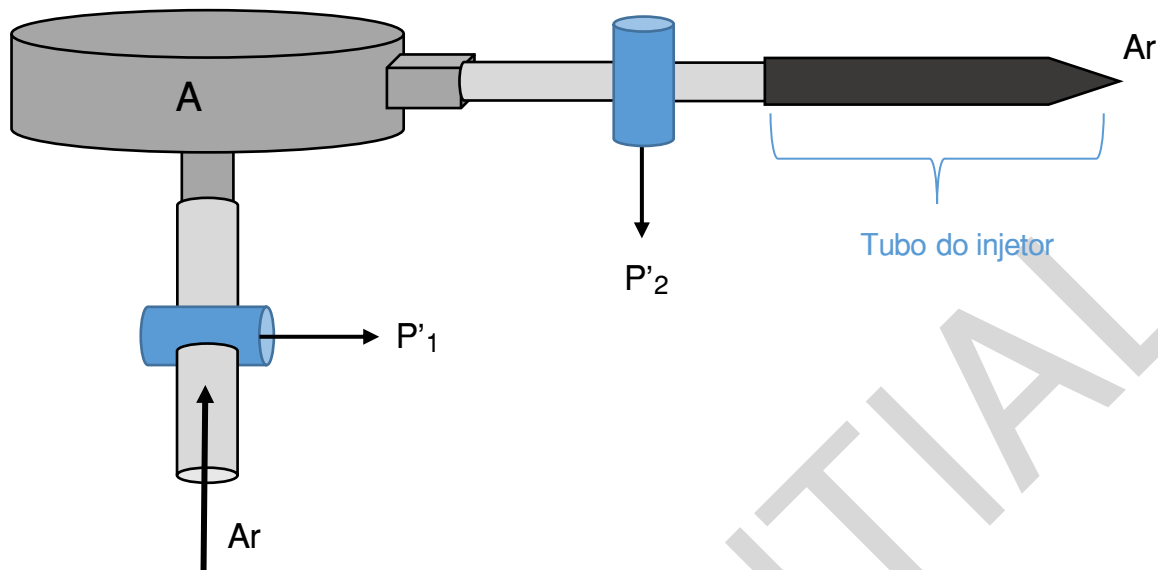


Figura 49 - Esquema da montagem experimental utilizada para teste de desempenho do protótipo de microválvula piezoelétrica (A) desenvolvido neste trabalho. Estes testes incluíram a quantificação da queda de pressão associada à atuação do bender incorporado no protótipo da microválvula piezoelétrica.  $P'_1$  e  $P'_2$  quantificam a queda de pressão referida.

As pressões  $P'_1$  e  $P'_2$  foram medidas a montante e a jusante do modelo de simulação, à semelhança das suas congêneres de  $P_1$  e de  $P_2$  que foram medidas a montante e a jusante da microválvula solenoide, respetivamente. Deste modo é possível estabelecer-se uma comparação entre os valores obtidos de queda de pressão em ambas as montagens experimentais, i.e. microválvula solenóide (Figura 42) e protótipo de microválvula piezoelétrica (Figura 49).

CONFIDENTIAL

# 5. Resultados

CONFIDENTIAL

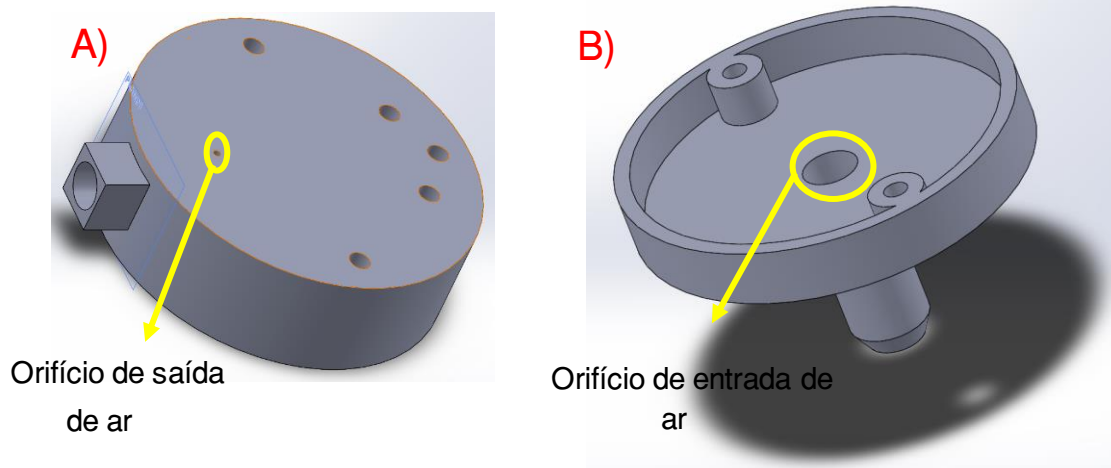
## Resultados

O comportamento do atuador acoplado ao modelo de simulação (bender 1) produzido por manufatura aditiva é uma peça fundamental para o estabelecimento da prova de conceito relativa à funcionalidade da microválvula com atuador piezoelétrico.

No presente capítulo analisar-se-ão os resultados referentes à resposta do atuador quando sujeito a um campo elétrico aplicado de intensidade variável (secção 5.2) bem como ao impacto dos diferentes deslocamentos do atuador no escoamento do gás no circuito das microválvulas (secção 5.3). No seu conjunto, estes resultados são fundamentais para caracterizar o desempenho da válvula com atuador piezoelétrico, comparando-o com o da atual microválvula, e estabelecer as potencialidades da estratégia de atuação piezo face à atuação com solenoide

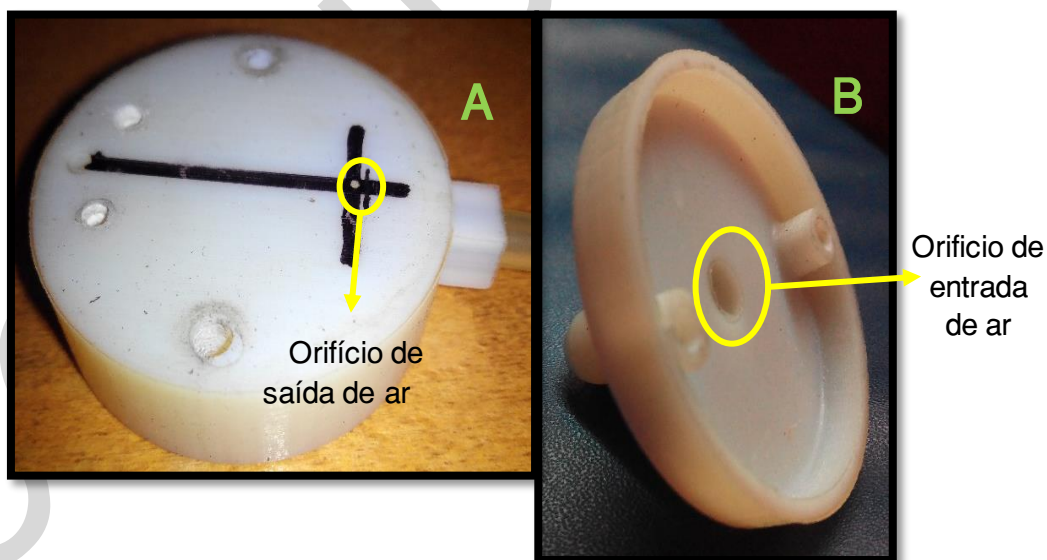
### 5.1. Desenho e manufatura aditiva de protótipo para prova de conceito

Por recurso à ferramenta SOLID WORKS (2017-2018 *Student edition*) desenhou-se o referido protótipo. Os desenhos tridimensionais das duas partes da válvula protótipo são apresentados nas Figuras 50 A) (parte superior) e 50 B) (parte inferior).



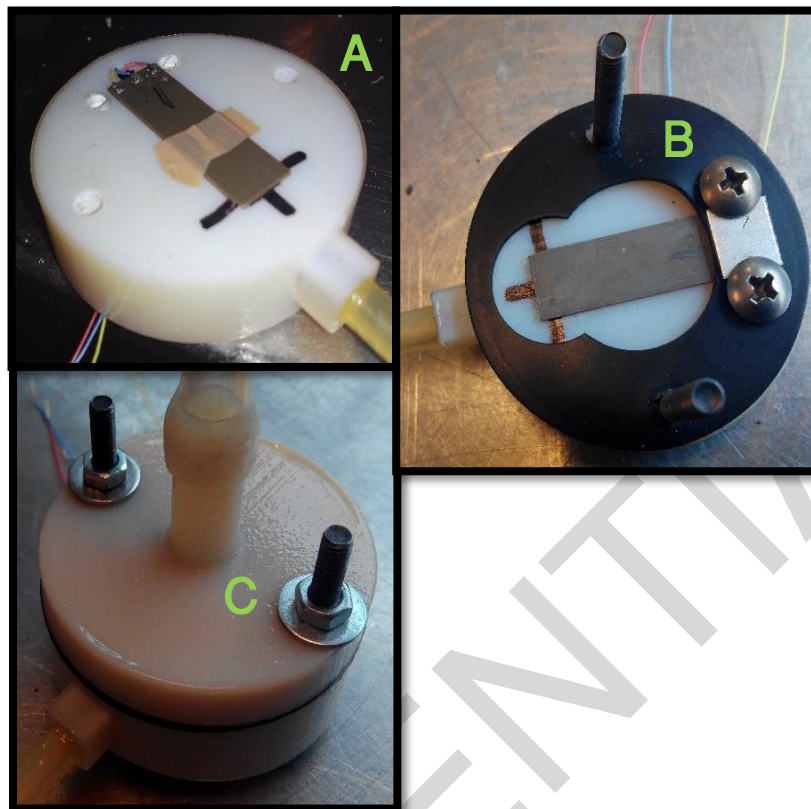
*Figura 50 – A) Parte superior do protótipo para simulação dos testes escoamento e B) parte inferior do protótipo para simulação dos testes de escoamento [desenhos concebido em SolidWorks 2017 - 2018]. O orifício de entrada de ar tem 6.9 mm de diâmetro e o orifício de saída de ar tem 1mm de diâmetro.*

O protótipo impresso em ABS pode ser observado nas Figuras 51 e 52.



*Figura 51 – Protótipo de válvula impresso em ABS: A) parte superior; B) parte inferior. A figura ilustra também a localização do bender.*



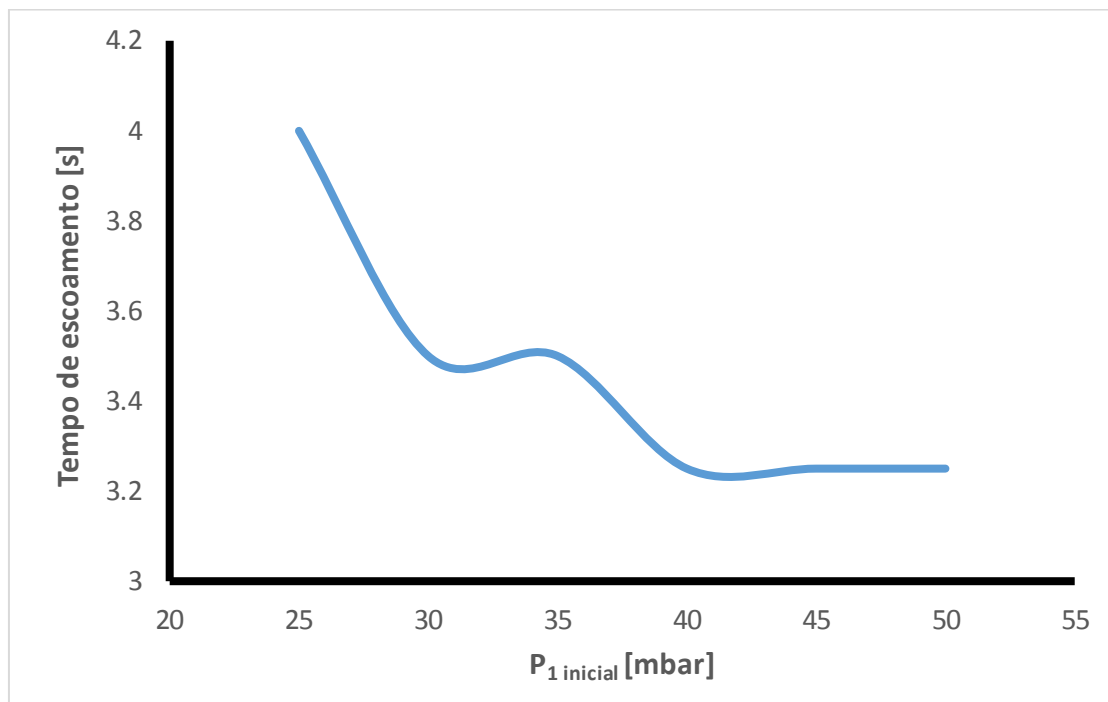


*Figura 52 - Protótipo de válvula impresso com o bender acoplado: A) alinhamento do bender; B) fixação do bender e colocação de vedante; C) protótipo finalizado.*

## 5.2. Escoamento do fluido na microválvula solenoide

Para se avaliar o tempo que o fluido acumulado na câmara de pressão necessita para se escoar, fixou-se um valor de  $P_1$  e quando este se encontrava estável ativou-se a microválvula FO. Dessa forma interrompeu-se a alimentação de ar para a câmara e o ar que nela estava acumulado fluíu pela microválvula FC (que se encontrava ativada). Quando  $P_1$  toma um valor nulo deixa de existir ar na câmara.

Na Figura 53 está representado esse mesmo tempo em função da pressão inicial na câmara.



*Figura 53 - Tempo de escoamento total do ar da microválvula de solenoide em função de  $P_1$  inicial. A pressão varia entre 25 e 50 mbar<sub>1</sub>.*

O tempo de escoamento do fluido é definido, de um modo geral, por duas variáveis: o volume de fluido existente desde a microválvula normalmente aberta até ao orifício do injetor de saída de gás e as dimensões dos orifícios que tem de atravessar até à sua saída.

Com base na curva apresentada na Figura 53 é possível referir-se que a maiores valores de pressão inicial correspondem menores tempos de escoamento.

A curva da Figura 53 apresenta dois mínimos. Existe quase como que uma estabilização do tempo de escoamento para pressões compreendidas entre 30 e 35 mbar.

Para valores mais elevados de  $P_1$  (superiores a 40 mbar) o tempo de escoamento também estabiliza.

Este será um ensaio a repetir quando o bender for incorporado numa válvula que garanta o volume de fluido acima descrito.

## 5.2 Deslocamento do atuador piezoelétrico

Recorrendo ao apparatus descrito na secção 4.2 (Figura 47), registaram-se diferentes tipos de respostas dos atuadores à tensão aplicada.

Na Figura 54 tipifica-se a resposta do sensor em termos do seu deslocamento quando sujeito a um pulso de tensão (aumento de tensão em forma de degrau) durante um determinado período de tempo:

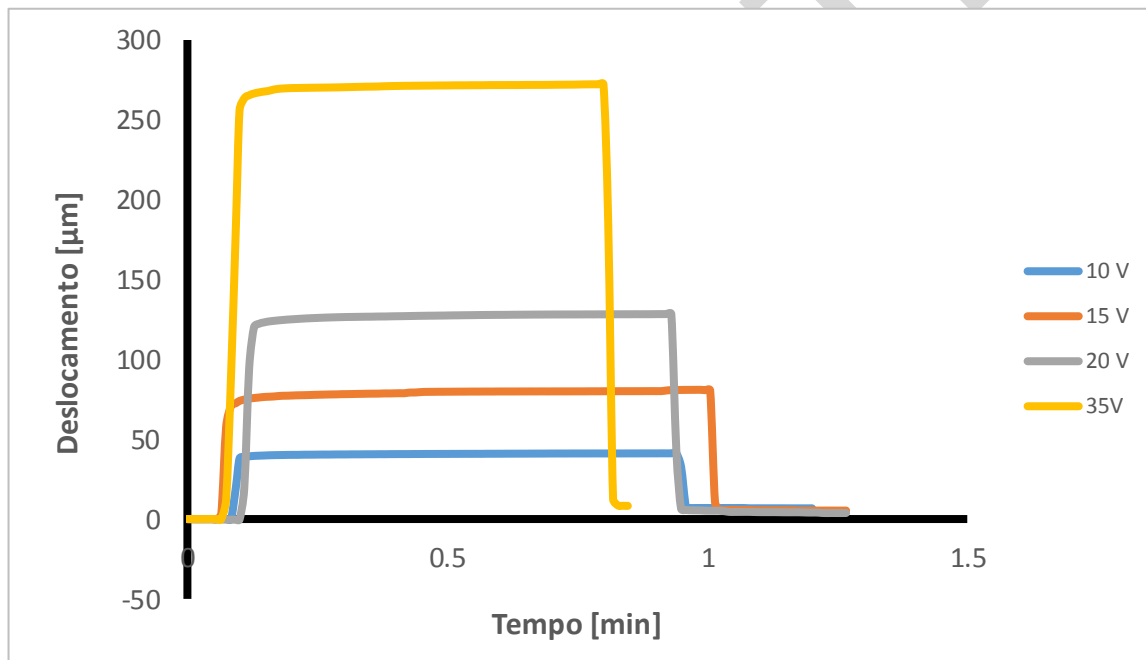


Figura 54 – Resposta do bender 1 a diferentes pulsos de tensão aplicada. O deslocamento do sensor varia entre 128 μm e 272 μm quando a amplitude do pulso varia entre 10 e 35V.

Observa-se que o atuador responde rapidamente após imposição do pulso de tensão, levando o seu deslocamento, em média, cerca de 0,1 minuto a estabilizar (considerou-se como origem dos tempos, i.e.  $t=0$ , o momento em que o operador fixa a variação de tensão que a fonte deve aplicar ao atuador). Este tempo de estabilização reflete por um lado, o tempo de resposta do próprio sensor de deslocamento (LVDT), e por outro o tempo de resposta da própria fonte de tensão, i.e. quando o operador fixa

um determinado valor de tensão a impor ao atuador, a fonte não o aplica imediatamente. Observa-se também que a amplitude do deslocamento aumenta com o aumento do campo aplicado ao atuador. Esta observação está em linha com o comportamento previsto pela equação que descreve o efeito piezoelétrico inverso, equação 11 apresentada na secção 2.2.2.

Na Figura 55 representa-se a variação do deslocamento de cada atuador com o valor da diferença do campo aplicado.

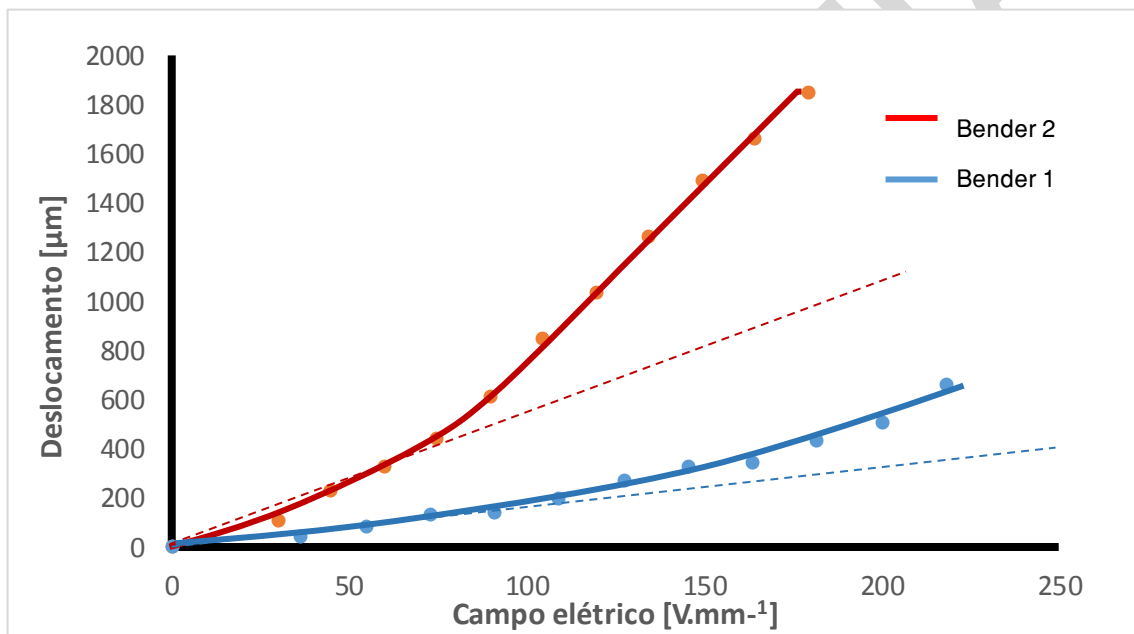


Figura 55 – Deslocamento de cada um dos benders em função do campo elétrico a que é sujeito.

Constata-se que ambos os benders apresentam maiores deslocamentos quando sujeitos a diferenças de potencial superiores. De acordo com Wang Q.M. et al a relação entre o deslocamento de um bimorfo e o campo aplicado (E) pode ser descrita pela equação 25<sup>38</sup>

$$\Delta x = K_1 \left( \frac{3L_{atuador}^2}{2t_{atuador}} \right) d_{31} E \quad (Eq. 25)$$

em que L e t são o comprimento e a espessura total do atuador, respetivamente,  $d_{31}$  o coeficiente piezoelétrico do cerâmico constituinte das camadas, e E o campo aplicado;

$K_1$  é uma constante, função da razão entre as espessuras da camada metálica (elétrodo) central e dos cerâmicos bem com da razão entre os módulos de Young da camada metálica e do cerâmico. Quando a espessura da camada metálica (ver secção 4.2 Figura 46) é muito diminuta comparada com a das camadas cerâmicas, a constante  $K$  tende para um. A equação 25 prevê que um bimorfo apresente uma variação linear do deslocamento com o campo aplicado. No caso presente observa-se que o comportamento dos dois benders se afasta da linearidade, e de forma mais acentuada à medida que o campo aumenta. Esta tendência foi reportada na literatura para o PZT<sup>38</sup> sugerindo-se justificações associadas à movimentação de paredes de domínios ferroelétricos condicionadas pelo campo aplicado<sup>38</sup>

Os deslocamentos máximos para cada um dos benders são de 658  $\mu\text{m}$  para o bender 1 e de 1845  $\mu\text{m}$  para o bender 2, medidos sob a ação de um campo de 218  $\text{V}\cdot\text{mm}^{-1}$  e de 179  $\text{V}\cdot\text{mm}^{-1}$ , respetivamente. Observa-se também que a relação entre os deslocamentos dos dois benders ( $\Delta X_1/\Delta X_2$ ), medidos na região linear das curvas, e sob um mesmo campo aplicado, é sensivelmente constante e igual a cerca de 2,9. De acordo com a equação 25, em igualdade de condições de construção (de tipo de cerâmico e de camada metálica), a razão entre os deslocamento de dois benders de diferente comprimento e espessura é igual a  $[(L_1/L_2)^2 \cdot (t_2/t_1)]$  para um valor de  $K=1$ . No caso presente, assumindo  $K_1=1$  (o que é aceitável para uma camada metálica com funções de elétrodo), verifica-se que valor da expressão  $[(L_1/L_2)^2 \cdot (t_2/t_1)]$  para os dois bimorfos em análise é de 2,7, valor muito próximo de  $(\Delta L_1/\Delta L_2)$ . Este resultado aponta no sentido de os dois benders em estudo serem de construção semelhante, diferindo entre si em termos de comprimento e de espessura.

Monitorizou-se o comportamento histerético do atuador de maiores dimensões (*bender 2*). Por comportamento histerético entende-se um desvio entre as curvas de deslocamento durante a ativação e desativação do *bender*. Para tal, este foi sujeito a uma variação da tensão aplicada, impondo sucessivos escalões positivos até se atingir um valor máximo, e seguidamente escalões negativos até regressar ao ponto de partida, completando-se assim um ciclo de variação de tensão. Durante a variação do

campo aplicado monitorizou-se a variação do deslocamento. Este procedimento foi repetido, usando-se 20, 40 e 60V como valores máximos da tensão aplicada.

Os resultados obtidos estão representados na Figura 56.

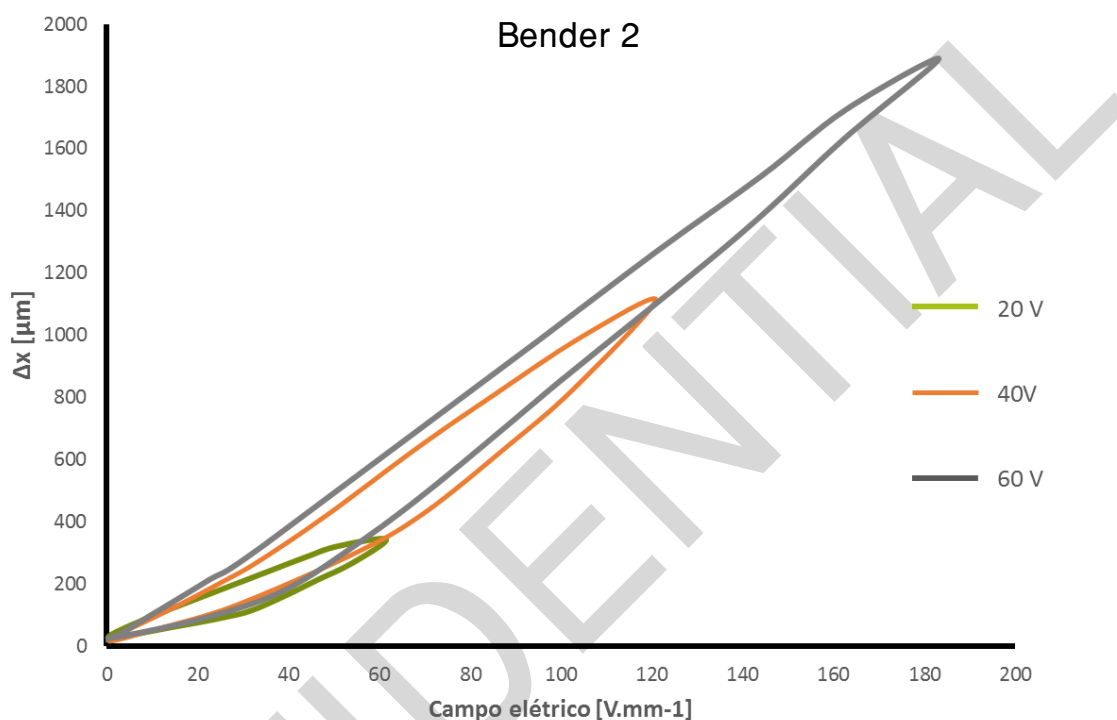


Figura 56 - Curvas de histerese do bender 2: variação do deslocamento com o campo aplicado, usando como máximos de tensão aplicada em cada ciclo os valores de 20, 40 e 60V.

O comportamento do *bender 2* é bastante semelhante ao apresentado na anterior Figura 56. Este comportamento histerético, analisado na secção 2.2. é devido a efeitos de polarização, cuja magnitude depende dos contributos de domínios ferroelétricos, muito dependentes do campo aplicado e do sentido da sua variação. Se se pretender que o *bender* apenas apresente duas posições (totalmente fletido e no seu estado de repouso) este comportamento pode não grande relevância. Quando se procuram deslocamentos intermédios, ou deslocamentos bem definidos para valores de diferenças de potenciais intermédios é importante que ter em consideração os comportamentos apresentadas na Figura 56.

A estabilização no tempo do comportamento deste tipo de dispositivos é um parâmetro igualmente importante na caracterização do *bender*. Nas Figuras 57 e 58 apresentam a percentagem de variação do deslocamento com o tempo, para cada um dos benders, quando sob a ação de uma tensão ou campo elétrico constante.

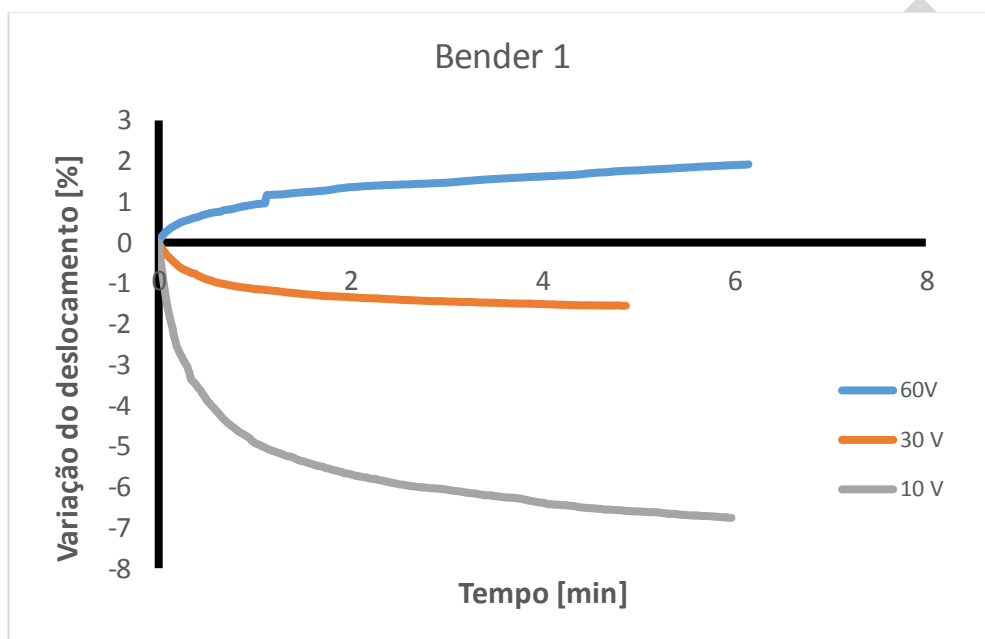
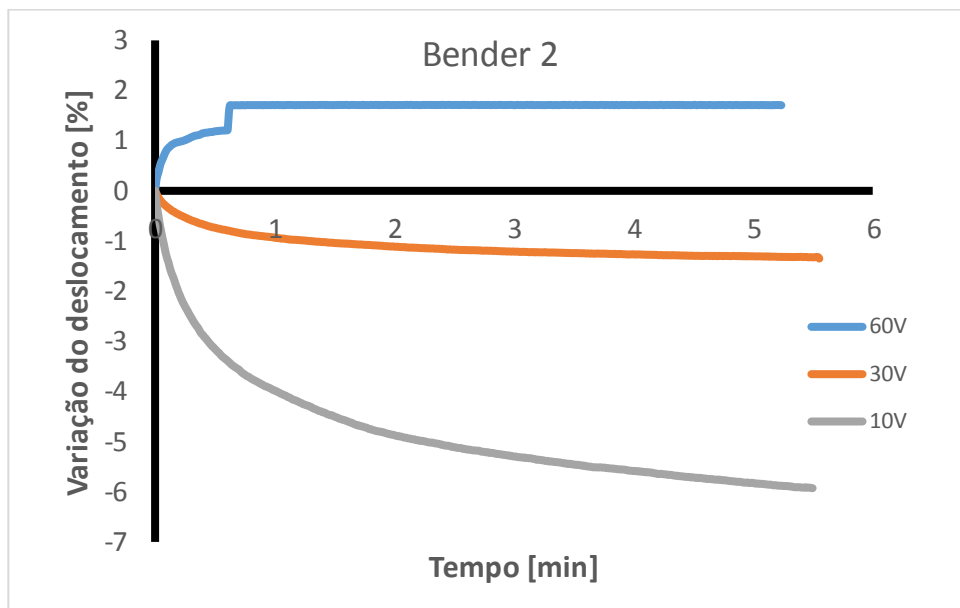


Figura 57 - Variação do deslocamento do bender 1 (expressa em percentagem do deslocamento inicial) em função do tempo de aplicação de uma diferença de potencial constante de 10, 30 e 60V.



*Figura 58 - Variação do deslocamento do bender 2 (expressa em percentagem do deslocamento inicial) em função do tempo de aplicação de uma diferença de potencial constante de 10, 30 e 60V.*

Quando ativados com 10V e 30V, ambos os benders evidenciam uma variação negativa de deslocamento, ou seja, o dispositivo perde alguma da sua polarização e recupera parte da sua deformação. A variação observada nestes dois casos tende a estabilizar.

Verifica-se também que para a menor diferença de potencial aplicada o bender apresenta uma maior variação do seu deslocamento. Tal facto pode ser devido a uma maior instabilidade da sua polarização sob valores baixos de campos elétricos.

O máximo de diferença de potencial a que os benders podem ser expostos são 60V. Nesta situação apresentam o seu deslocamento máximo. A força que o bender consegue gerar tem o seu mínimo no ponto de máximo deslocamento. Por conseguinte a variação de deslocamento positiva que se observa na curva relativa aos 60V poderá ser eventualmente justificada com uma deformação mecânica gerada pela vareta de medição do LVDT.

Este comportamento de drift (para 10 e 30V) anteriormente descrito, é bastante usual neste tipo de dispositivos<sup>14, 34</sup>.



## 5.3 Prova de conceito

### 5.3.1 Escoamento do fluido no protótipo da nova válvula

O modelo da microválvula (protótipo) foi impresso em ABS, como acima referido, e acoplado com o atuador piezoelétrico (bender 1). Este conjunto, doravante designado por microválvula piezo, foi testado em operação, impondo diferentes diferenças de potencial ao atuador e caracterizando para cada tensão imposta o escoamento do fluido (determinação de caudal).

Na Figura 59 apresentam-se a variação dos valores da queda de pressão ( $P_1 - P_2$ ) em função da pressão  $P_1$  criada na câmara A (ver Figura 52), para diferentes valores dos diferentes valores de tensão aplicada ao atuador, ou seja, diferentes valores do seu deslocamento. Para efeitos comparativos representou-se no mesmo gráfico a curva correspondente à microválvula solenoide de montagem da Figura 44 (curva vermelha, na Figura 59).

Os valores de pressão apresentados são relativos à pressão atmosférica. A pressão absoluta é dada então pela soma dos valores que seguidamente se apresentam com o valor pressão atmosférica.

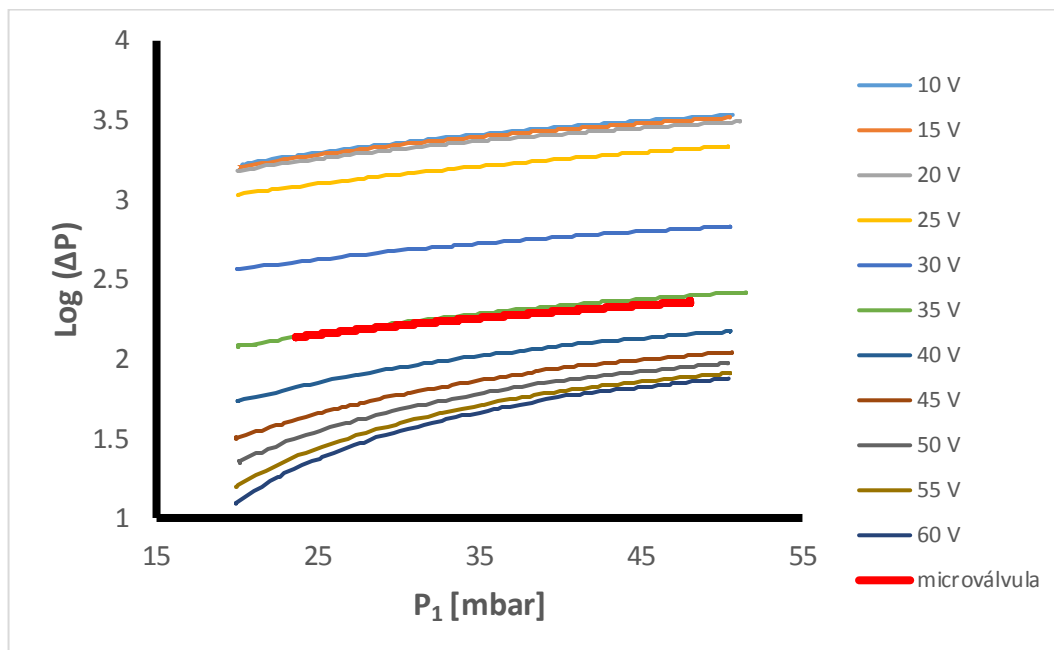


Figura 59 - Queda de pressão originada pelo orifício de saída de ar em função de  $P_1$ . O atuador foi ativado com diferenças de potencial que variaram entre 10 e 60V.

Observa-se globalmente que quando os valores de tensão impostos ao atuador são inferiores a 50V, o que de acordo com a Figura 54 origina deslocamentos inferiores a 428 $\mu$ m, registam-se elevadas quedas de pressão, com valores muito acima dos registados para a microválvula solenoide. Por conseguinte constata-se que, para reproduzir quedas de pressão semelhantes ou próximas das registadas na microválvula solenoide, podem usar-se tensões de 35V ou ligeiramente superiores, dispensando-se as tensões superiores a 40V, ou seja, não é necessário operar-se com o valor máximo do deslocamento do atuador. Este resultado indica que, em caso de conveniência de layout dimensional da microválvula, se podem usar atuadores com comprimento livre inferior ao que foi usado. Por outro lado, o facto de não ser necessário impor ao atuador tensões superiores a 40V, terá impacto na curva de histerese, diminuindo-a tendencialmente. Este dado pode revestir-se de alguma relevância no caso de se pretender usar o atuador em situações que não sejam apenas de resposta ON-OFF (abre tudo ou fecha tudo), mas que exijam um deslocamento controlado do atuador

mediante a manipulação da tensão imposta, situação esta frequentemente designada como “válvula modelante”.

O conhecimento da queda de pressão  $\Delta P$  associada ao orifício do atuador pode ser usado para estimar caudais de gás, assumindo como pressupostos simplificativos que o coeficiente de descarga do orifício de passagem do gás ( $C_D=0.85$ ) não se altera significativamente com a mudança de atuador. Recorrendo à equação 20, e tendo em consideração os diferentes valores de deslocamento do atuador como critério para cálculo da área de passagem do fluido no orifício ( $A_s$  ou  $A_1$ , Figura 45), estimaram-se os valores de caudais de gás correspondentes às diferentes quedas de pressão através do orifício da válvula. A Figura 60 ilustra os resultados obtidos. Para efeitos de comparação, incluíram-se os valores de caudais associados à microválvula (pontos vermelhos).

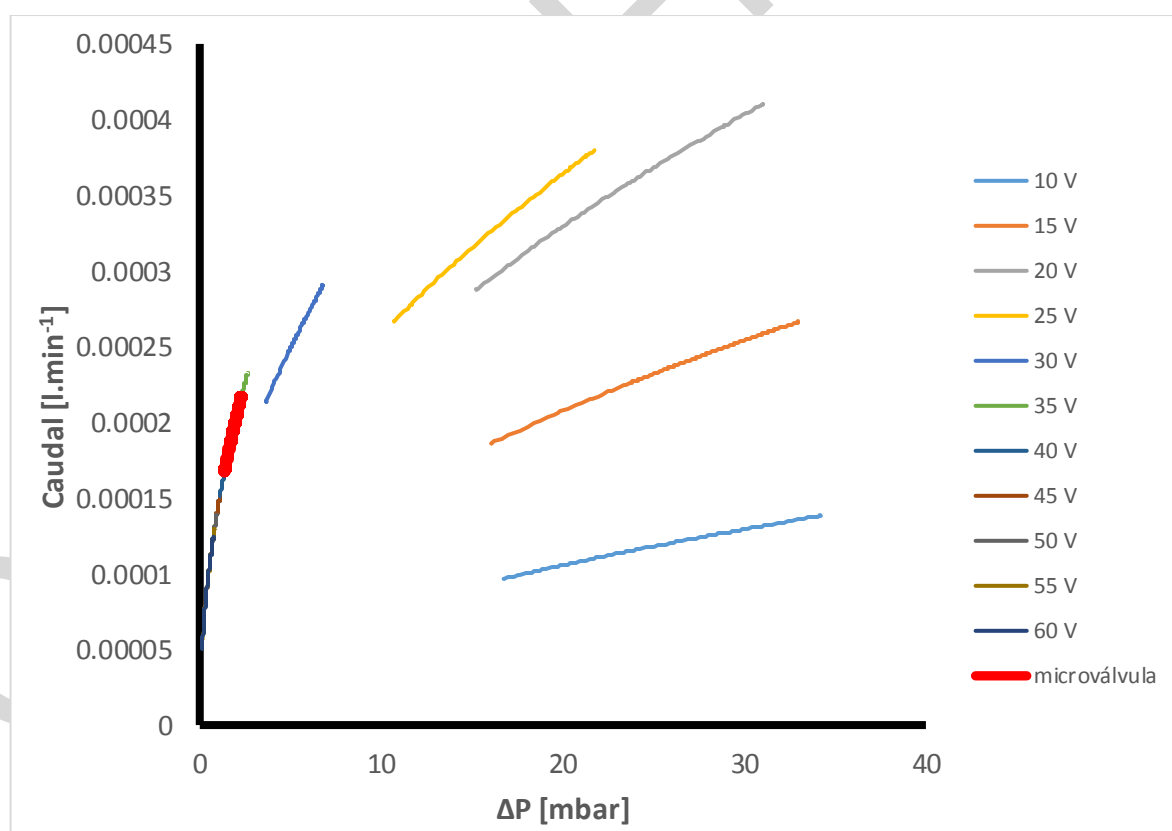
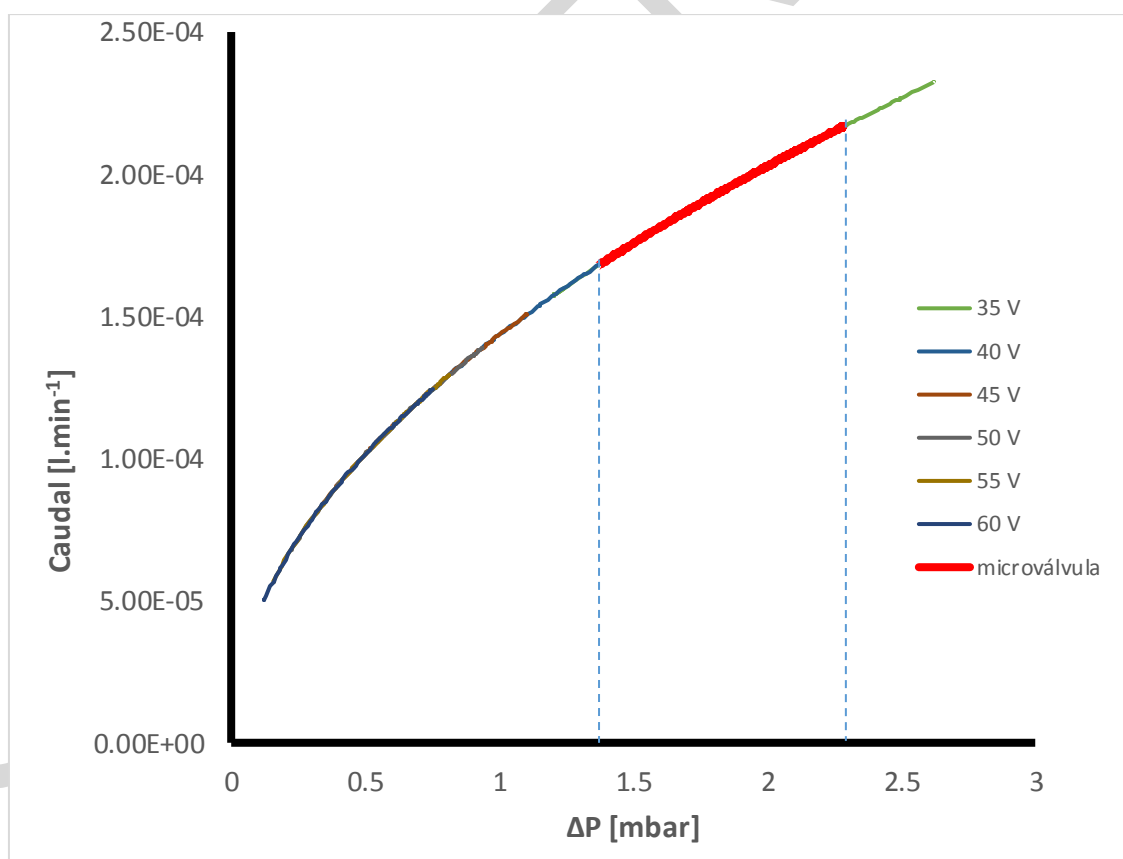


Figura 60 - Variação do caudal de gás (ar) através do orifício da válvula em função da variação da queda de pressão através da válvula. A tensão aplicada ao bender variou entre os 10 e os 60V.

A variação de tensão imposta ao atuador para registo quedas de pressão associadas à Figura 60 variou entre 10 e 60V. Observa-se que o funcionamento da válvula piezo em termos de escoamento do gás se assemelha ao da válvula solenoide quando esta é ativada com uma tensão de 35V.

Na Figura 61 ampliou-se uma parte da figura anterior (Figura 60) para realçar o posicionamento dos valores de caudais estimados para a válvula piezo e os calculados para a válvula solenoide. Dado que os deslocamentos do atuador piezo que asseguram quedas de pressão semelhantes nas válvulas (solenoide e piezo), são deslocamentos superiores a 0,250 mm, a área de orifício é igual para os dois tipos de válvula pelo que as estimativas de caudal também se sobrepõem-se também tal como a Figura 61 documenta.



*Figura 61 - Queda de pressão originada pelo orifício de saída de ar em função do caudal de ar que o atravessa. O bender foi ativo com uma diferença de potencial que variou entre 35 e 60V. É também apresentada a vermelho a queda de pressão originada pela microválvula de solenoide que se situa entre as quedas de pressão geradas pelo bender ativado a 35 e 40V.*

Na Figura anterior é mais evidente o intervalo de valores em que se situa a queda de pressão da microválvula.

À microválvula normalmente fechada não é exigida estanquicidade. Por esse motivo não se torna necessário que depois de teste de escoamento do gás, a pressão seja nula. E este facto foi confirmado: quando o atuador está desativado regista-se uma pressão  $P_2$  de 2,8.

Na Figura 62, para um valor fixo de  $P_1$  igual ao seu valor máximo ( $P_1 = 50\text{mbar}$ ) descreve-se a variação da queda de pressão para diferentes valores de diferença de potencial aplicado ao atuador. Os valores necessários à construção desta curva podem obter-se efetuando um corte vertical na Figura 59, a  $P_1 = 50\text{mbar}$ . O gráfico obtido evidencia um primeiro *quasi* patamar para baixos valores de potencial, ao qual se segue um forte decaimento e por fim um segundo patamar. Como já referido existe um valor de potencial que define o deslocamento do atuador (0,250mm) a partir do qual a área a usar na equação 20 deixa de ser definida como a área lateral cilíndrica e passa a ser definida como a área de um círculo. Essa voltagem é de 30V. Pode assim afirmar-se que para tensões aplicadas inferiores a 30V, os deslocamentos são pequenos, inferiores a 25% do diâmetro do orifício. Nessas circunstâncias o próprio deslocamento é contabilizado no cálculo da área de passagem e por conseguinte influencia o caudal estimado (equação 23). Para valores de tensão superiores a 30V, a área passa a ser fixada pelo valor da área do orifício e, por conseguinte, o deslocamento não é usado no cálculo da área de passagem. A tensão de 30V constitui assim uma tensão a partir da qual a queda de pressão é pouco afetada por aumentos do deslocamento.

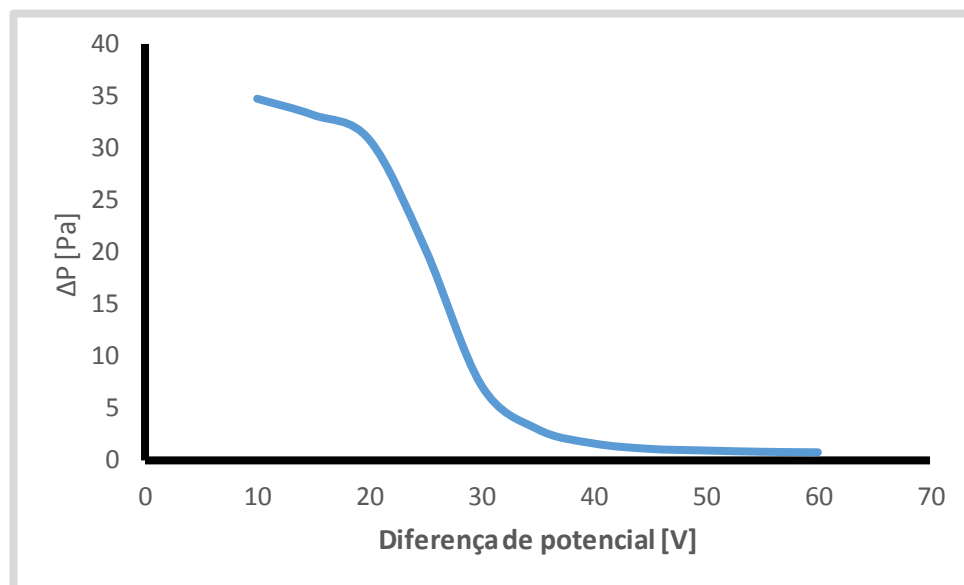


Figura 62 - Queda de pressão originada pelo orifício de passagem de gás do modelo de simulação em função da diferença de potencial aplicada ao bender. O valor de  $P_1$  foi mantido constante e igual a 50mbar.

Na Figura 63 caracteriza-se o comportamento da mesma válvula mas agora expresso em termos da variação do caudal com o deslocamento do atuador.

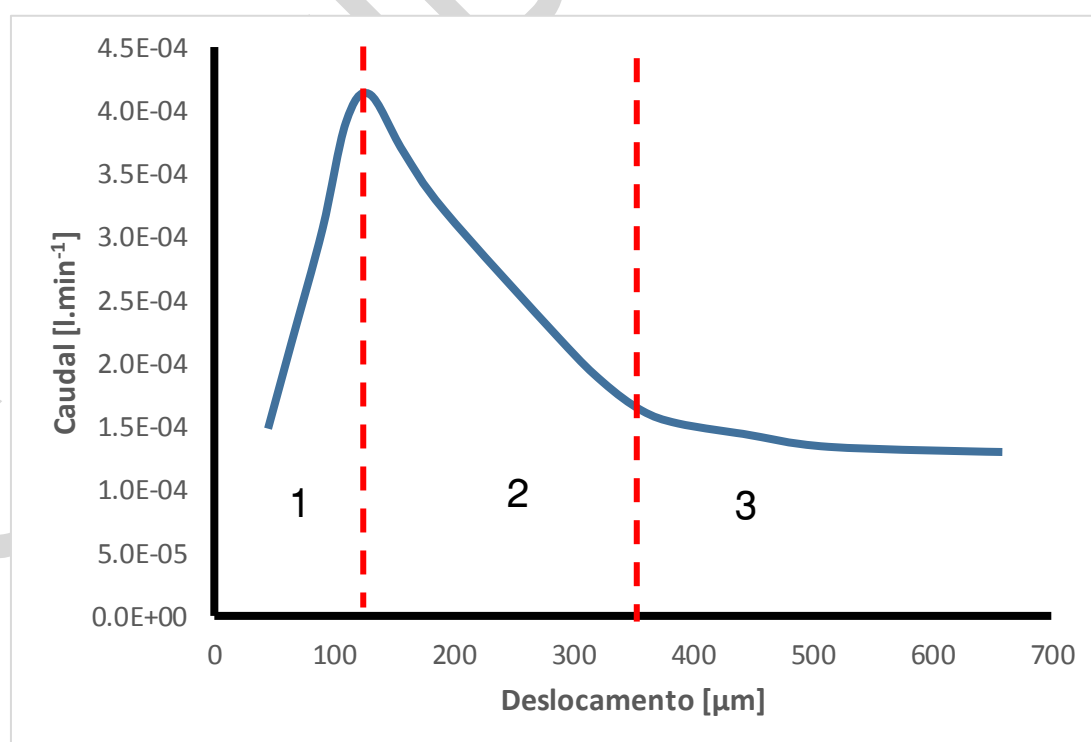


Figura 63 - Variação do caudal com o deslocamento do atuador

A curva traduz claramente três regimes diferentes: um primeiro regime para os valores pequenos do deslocamento (inferiores a  $150\mu\text{m}$ ); uma segunda região linear, para valores intermédios de deslocamento na região entre  $150$  e  $350\mu\text{m}$  e por fim um patamar final, onde o caudal praticamente não varia com o deslocamento. O segundo e terceiro regime coadunam-se com a análise anterior em termos do efeito do deslocamento do atuador no caudal. A primeira região reflete o efeito da variação do deslocamento no cálculo da área numa região em que a queda de pressão está num regime de quase patamar.

A região de decaimento quase linear do caudal com deslocamento aponta para uma gama de deslocamentos com potencial para ser explorada no controlo de caudal.

Globalmente, os resultados apresentados neste capítulo permitiram a caracterização da resposta (amplitude de deslocamento) dos atuadores piezoelétricos às variações de campo elétrico aplicado. O acoplamento do atuador dimensionalmente mais apropriado ao modelo de simulação da microválvula - (protótipo especificamente desenhado para o efeito, impresso em ABS) e a caracterização das condições de escoamento neste protótipo demonstrou que é possível reproduzir condições de operação semelhantes às observadas na microválvula em termos de queda de pressão, quando o bender é ativado com uma diferença de potencial de cerca de  $35\text{V}$ . Nestas condições, atendendo à amplitude dos deslocamentos evidenciados pelo bender e ao facto da área de orifício do protótipo ser igual à da microválvula solenoide, estimaram-se para o protótipo caudais idênticos aos da microválvula solenoide, no pressuposto de iguais coeficientes de descarga para ambas as situações.

CONFIDENTIAL



# 6. Conclusão

CONFIDENTIAL

## Conclusão

Como mote do presente projeto foi apresentada a possibilidade da substituição dos atuadores de solenóide de válvulas utilizadas pela Bosh Termotecnologia por atuadores piezoelétricos.

Foram estudados dois tipos de válvulas: as macroválvulas que apresentam um deslocamento do seu atuador de cerca de 3 mm e as microválvulas que vêm a elas associados cursos dos seus atuadores de 1 mm.

Depois de percebidas as especificações de cada um dos tipos de válvulas apresentou-se uma pesquisa bibliográfica, tão profunda quanto possível, sobre atuadores piezoelétricos.

Um atuador piezoelétrico é um dispositivo que apresenta um determinado deslocamento ou curso quando é sujeito a um campo elétrico. E existem diferentes configurações de atuadores piezoelétricos. A cada uma das configurações está associado um deslocamento e uma força de bloqueio. A atuadores com uma elevada força de bloqueio estão associados deslocamentos muito pequenos como se pode verificar nos *stacks*. Por outro lado, nos atuadores flexíveis (*benders*, discos, etc.) são observadas baixas forças de bloqueio mas deslocamentos mais elevados (podem atingir cerca de um milímetro). Os referidos deslocamentos são também função das dimensões dos atuadores: atuadores de maiores dimensões apresentam maiores deslocamentos.

Tendo em conta as dimensões das atuais válvulas, selecionadas pela Bosh Termotecnologia para este estudo, e as suas condições de funcionamento foi proposto a incorporação de um atuador em forma de disco na macroválvula e nas microválvulas a incorporação de atuadores do tipo *bender*.

Dado o tempo disponível para a realização deste projeto apenas foi testada a incorporação de um *bender* na microválvula. Para validar a sua utilização foi fabricado um modelo de simulação. Com esse modelo foi possível medirem-se as quedas de pressão geradas pelo seu deslocamento e compará-las com as da atual microválvula.

Através do controlo da diferença de potencial aplicada ao *bender* é possível fazer-se um controlo da queda de pressão associada à microválvula.

Para se igualarem as quedas de pressão verificadas na atual microválvula solenóide, o *bender* tem que ser sujeito a uma diferença de potencial que varie entre 35 a 40V. Nestas condições o atuador perfaz deslocamentos que variam aproximadamente entre os 272 $\mu$ m e os 327 $\mu$ m. O caudal passante na microválvula em função da flexão do *bender* apresenta diferentes regiões que estão relacionadas com as dimensões do orifício de passagem do fluido.

Assim conclui-se que é possível incorporar um dos atuadores piezoelétricos testado nas atuais microválvulas sem que para isso sejam necessárias modificações significativas no design da atual válvula. A otimização da implementação da atuação piezoelétrica em válvulas da Bosch Termotecnologia, nomeadamente a nível das tensões elétricas e custo, poderá passar pelo redimensionamento de algumas das válvulas.

CONFIDENTIAL

# ■ Referências Bibliográficas

## Referências bibliográficas

- (1) <http://www.upperplumbers.co.uk>, (consultado a 1 de Janeiro de 2017).
- (2) Serway, R. a.; Jewett, J. W. Physics for Scientists and Engineers, Volume 1. **2007**, 1215.
- (3) Formula, Q.; Theorem, B.
- (4) Mutschler, K.; Dwivedi, S.; Kartmann, S.; Bammesberger, S.; Koltay, P.; Zengerle, R.; Tanguy, L. Multi Physics Network Simulation of a Solenoid Dispensing Valve. *Mechatronics* **2014**, 24 (3), 209–221.
- (5) Balakrishnan, M.; Kumar, N. Detection of Plunger Movement in DC Solenoids. **2015**, 10.
- (6) <http://www.heattracing.co.uk/product-details/asco-solenoid-valves> (consultado a 8 de Junho de 2017).
- (7) <http://www.asco.com/en-us/Pages/solenoid-valve-series-320-s.aspx> (consultado a 8 de Junho de 2017).
- (8) <https://tameson.com/solenoid-valve-types.html> (consultado a 8 de Junho de 2017).
- (9) DV-2 Working Flow.
- (10) White, F. Fluid Mechanics. *McGraw-Hill, New York* **2010**, 862.
- (11) Mayergoyz, I.; Definitions, B.; Notation, A. a T.; Equations, P. C. *Hysteresis in Piezoelectric and Ferroelectric Materials*; 2005 Vol. 3, 337-452.
- (12) Vilarinho, P. M.; Joanni, E. *Os materiais nos anos 2000*; Fortes, M. A., Pereira, P. J., Eds.; IST Press: Lisboa, 2003, 329–338.
- (13) Ledoux, A. Theory of Piezoelectric Materials and Their Applications in Civil Engineering. **2011**, 49.
- (14) Moulson, A.; Herbert, J. Electroceramics. *Reports Prog. Phys.* **2003**, 339-409.
- (15) Vilarinho, P. M. Piezoelectrics, Pyroelectrics, Ferroelectrics, Incipient Ferroelectrics, Ferroelectric Relaxors, Applications, Fabrication 1. *World* **2005**, 3–33.

- (16) Rafiq, M. A. Electromechanical Properties of Engineered Lead Free Potassium Sodium Niobate Based Materials. **2013**, 1–235.
- (17) Shrout, T. R.; Zhang, S. J. Lead-Free Piezoelectric Ceramics: Alternatives for PZT? *J. Electroceramics* **2007**, *19*(1), 111–124.
- (18) Jaffe, B.; W., C.; H., J. Piezoelectric Ceramics. *Piezoelectric ceramics*; Academic Press: London, 1971.
- (19) Huaxiang, F.; Cohen, R. E. Polarization Rotation Mechanism for Ultrahigh Electromechanical Response in Single-Crystal Piezoelectrics, 2000, 281–283.
- (20) Yamamoto, T. Ferroelectric Properties of the PbZrO<sub>3</sub>–PbTiO<sub>3</sub>. **1996**, *Jpn. J. Ap*, 5104–5108.
- (21) [www.piceramic.com](http://www.piceramic.com) (consultado a 2 de Junho de 2017).
- (22) <http://www.morganelectroceramics.com/> (consultado a 2 de Junho de 2017).
- (23) Juliana, A.; Abra, M. Determinação dos coeficientes piezoelétricos Do cristal L-Arginina Hidroclorídrica Monohidratada por difração múltipla de raios-X usando uma fonte de radiação Síncrotron, Universidade Federal do Ceará, **2003**.
- (24) Xu, R.; Kim, S.-G. Figures of Merits of Piezoelectric Materials in Energy. *PowerMEMS* **2012**, 464–467.
- (25) <http://machinedesign.com/iot/making-piezoelectronics-work-you> (consultado a 8 de Janeiro de 2017).
- (26) Leighton, L. Piezoelectric Valve. **1985**, *8*(67), 1–16.
- (27) <http://www.morgantechnicalceramics.com/en-gb/products/piezo-ceramic-components/piezoceramic-tutorials/limitations/> (consultado a 7 de Junho de 2017)
- (28) Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. Piezoelectrics in Positioning. Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications. **2008**.
- (29) Holterman, J.; Groen, P. An Introduction to Piezoelectric Materials and Applications, Stichting Applied Piezo, 2013, 197-237.
- (30) [www.piezo.com](http://www.piezo.com) (Consultado a 1 de Junho de 2017).
- (31) Ouyang, P. R.; Zhang, W. J.; Gupta, M. M. A New Compliant Mechanical Amplifier

- Based on a Symmetric Five-Bar Topology. *J. Mech. Des.* **2008**, *130* (10), 104501.
- (32) Patent, U. S.; Chou, I. H.; Thomas, A.; Colleen, M.; Paul, S.; Je, C.; Oaks, N.; Robert, M.; Mlnn-, S.-P. Date of Patent : **2000**. Pub. No. US 2003/0222236 A1
- (33) <http://www.npoint.com/deciding-between-open-loop-and-closed-loop-piezo-stages/> (consultado a 8 de Junho de 2017).
- (34) Zhang, L. S.; Liu, Y. Bin; Pan, C. L.; Feng, Z. H. Leakage Current Characterization and Compensation for Piezoelectric Actuator with Charge Drive. *Sensors Actuators, A Phys.* **2013**, *199* (September), 116–122.
- (35) [http://www.pi-usa.us/tutorial/4\\_20.html#4\\_21](http://www.pi-usa.us/tutorial/4_20.html#4_21) (consultado a 8 de Junho de 2017).
- (36) Wong, K. V.; Hernandez, A. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mech. Eng.* **2012**, *2012*, 1–10.
- (37) <http://www.makeuseof.com/tag/what-is-3d-printing-and-how-exactly-does-it-work/> (consultado a 5 de Junho de 2017).
- (38) Wang, Q.-M.; Zhang, Q.; Xu, B.; Liu, R.; Cross, L. E. Nonlinear Piezoelectric Behavior of Ceramic Bending Mode Actuators under Strong Electric Fields. *J. Appl. Phys.* **1999**, *86* (6), 3352.
- (39) <https://pt.wikipedia.org/wiki/LVDT> (consultado a 7 de Junho de 2017).



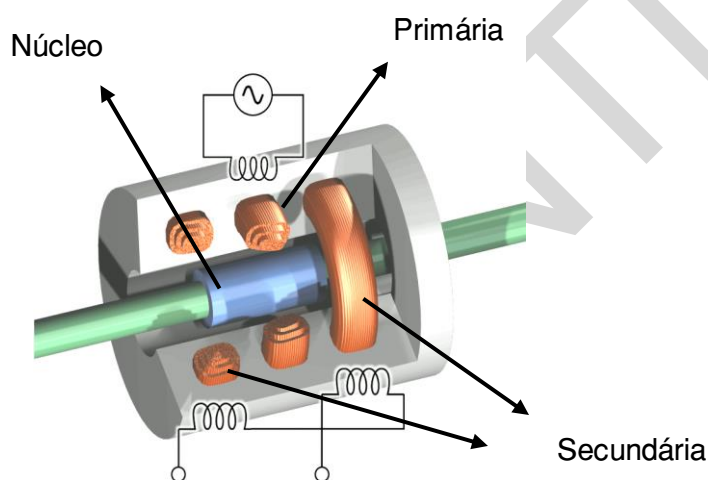
CONFIDENTIAL

## ■ Anexos

## Anexo 1.

### LVDT

O LVDT é um dispositivo sensor constituído uma bobine primária, duas bobines secundárias e um núcleo metálico ferroelétrico de alta permeabilidade <sup>39</sup> como se ilustra na Figura 64.



*Figura 64 - Vista do interior de um LVDT <sup>39</sup> evidenciando o seu núcleo e as bobines primárias e secundárias.*

O núcleo do sensor é móvel e está em contacto com o corpo de teste cuja expansão ou contração se pretende monitorizar. A bobine primária é excitada por um sinal elétrico alternado (A – Figura 64) com uma frequência que pode variar de 1 a 10 kHz consoante o tipo de aplicação do sensor <sup>39</sup>. A diferença de potencial aplicada na primeira bobine induz uma tensão em cada uma das bobines secundárias que depende da posição do núcleo. Quando o núcleo está centrado na bobine primária as tensões induzidas nas bobinas secundárias são tais que a diferença de potencial medida nos terminais das mesmas (B – Figura 64) é nula. Ou seja, como o núcleo se encontra equidistante das duas bobines, induz nestas tensões opostas de igual amplitude. Quando o núcleo se move por ação da contração ou expansão do corpo de teste, esta diferença de potencial

medida nos terminais das bobinas secundária deixa de ser nula, ou seja a tensão induzida é maior numa das duas bobinas secundárias. Desta forma e tendo em conta a fase do sinal de saída das bobinas secundárias é possível monitorizar o deslocamento linear do corpo de teste.

## Anexo 2.

### Ligações elétricas dos benders

A Figura 42 esquematiza as ligações elétricas do atuador:

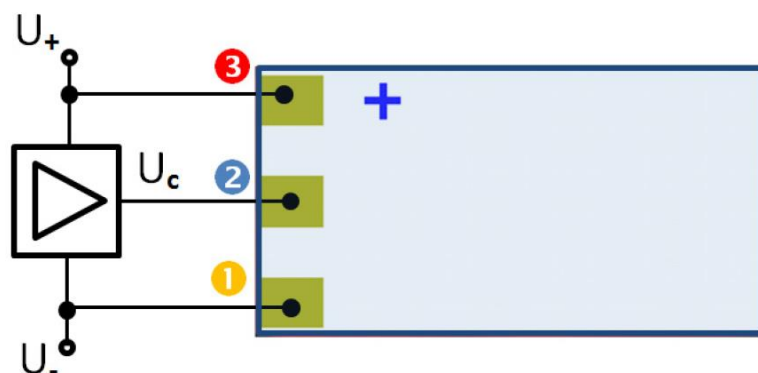


Figura 65 - Esquema de conexão elétrica do bender. A cada uma das ligações  $U_+$ ,  $U_c$  e  $U_c$  corresponde uma opção de ligação presente na tabela 3.

A cada um dos diferentes cabos (1, 2 e 3) é atribuída uma ligação. Existem duas opções de ligação que estão descritas na tabela 4.

Tabela 4 - Opções de configurações elétricas para os bender piezoelétrico

Conexão/fio (fig.30)	1	2	3
Designação da diferença de potencial	$U_-$	$U_c$	$U_+$
Opção 1	Terra	0 a 60V	60V
Opção 2	-30V	-30 a 30V	30V

Utilizando a opção 1 o deslocamento do *bender* é apenas num sentido, ou seja, sendo o seu estado de repouso uma posição totalmente horizontal com esta configuração o seu deslocamento apenas toma ou sinal (positivo ou negativo relativamente ao eixo das cotas).

Com a opção 2 o *bender* apresenta um deslocamento simétrico, ou seja, possui dois deslocamentos máximos de sinais opostos.

No contexto do presente trabalho e para que satisfaça as necessidades em termos de funcionamento da microválvula, será utilizada a opção 1.

### **Anexo 3.**

#### **Deslocamentos piezoelétricos**

As Figuras 64 e 65 representam os deslocamentos dos benders caracterizados (a várias diferenças de potencial) em função do tempo de medição. A cada medição foi feito um ajuste do ponto de deslocamento nulo da vareta do LVDT. A cada patamar corresponde o deslocamento máximo induzido pela referida diferença de potencial

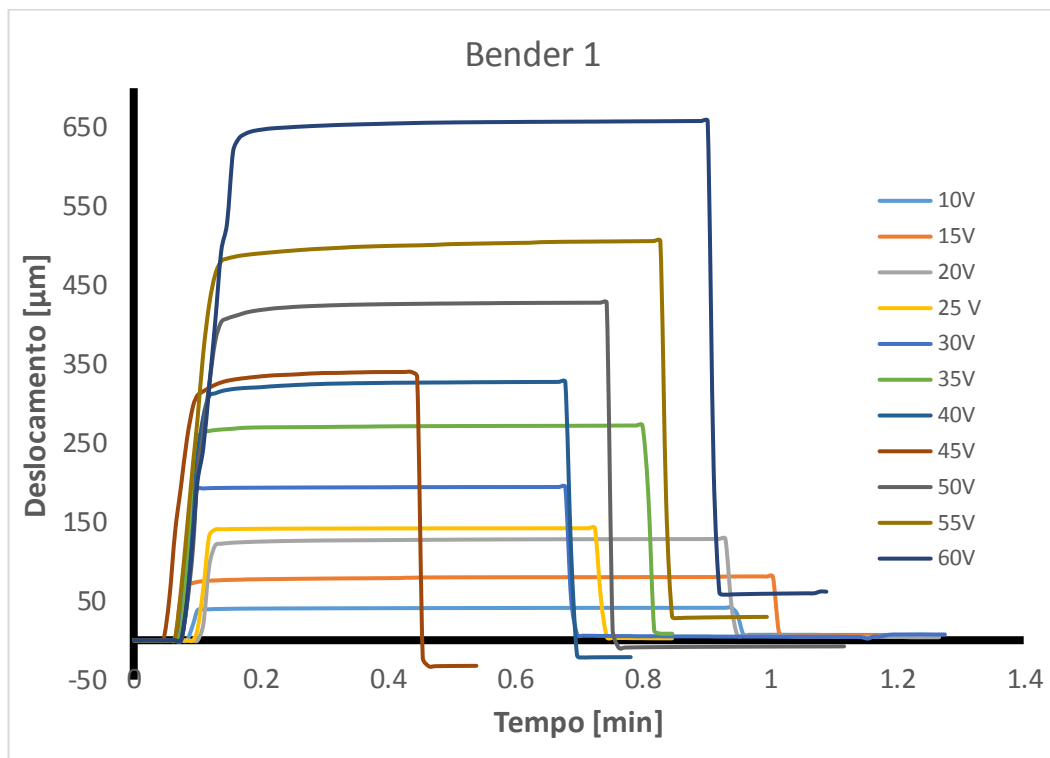


Figura 66 - Deslocamento do bender de menores dimensões em função do tempo de medição.

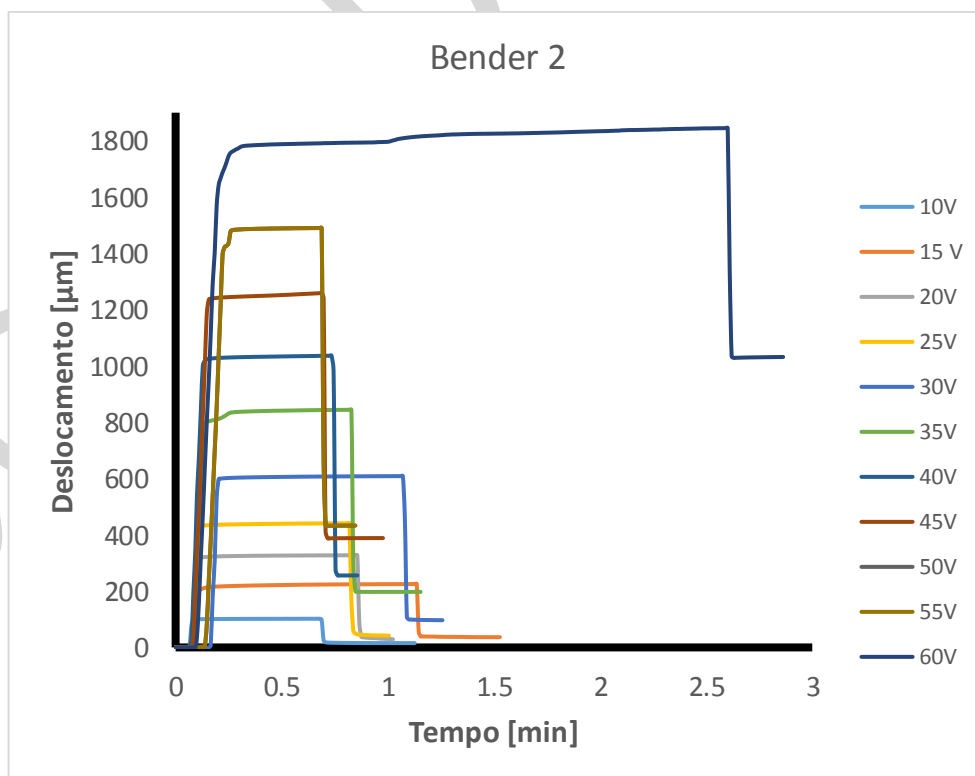


Figura 67 - Deslocamento do bender de maiores dimensões em função do tempo de medição.

## Anexo 4.

### Curvas de histerese

Encontram-se neste anexo as curvas utilizadas para se representar a histerese do bender 2. Cada Figura corresponde a uma diferença de potencial aplicada máxima: Figura 68 – 20V; Figura 69 – 40V; Figura 70 – 60V.

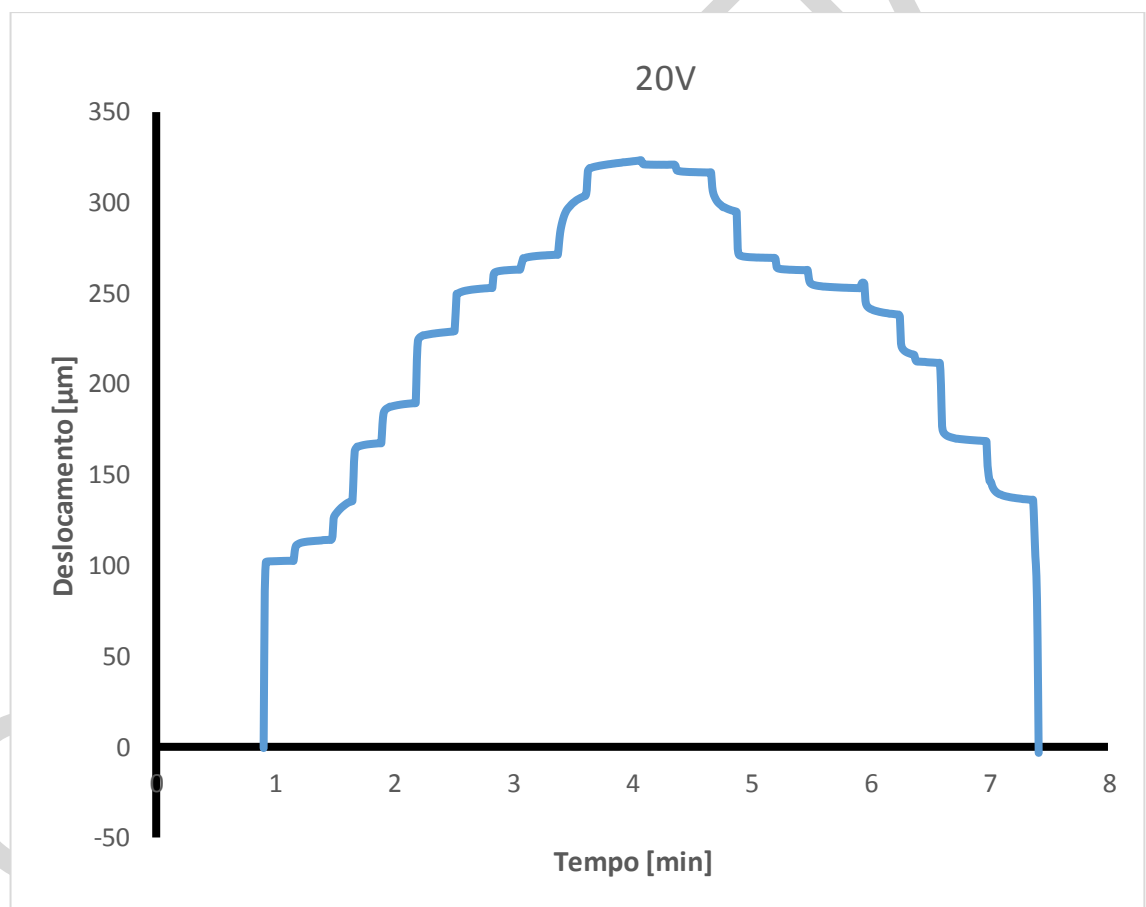


Figura 68 - Deslocamentos do bender 2 em função do tempo de medição utilizados para representar a curva de histerese correspondente a uma diferença de potencial máxima aplicada de 20V.

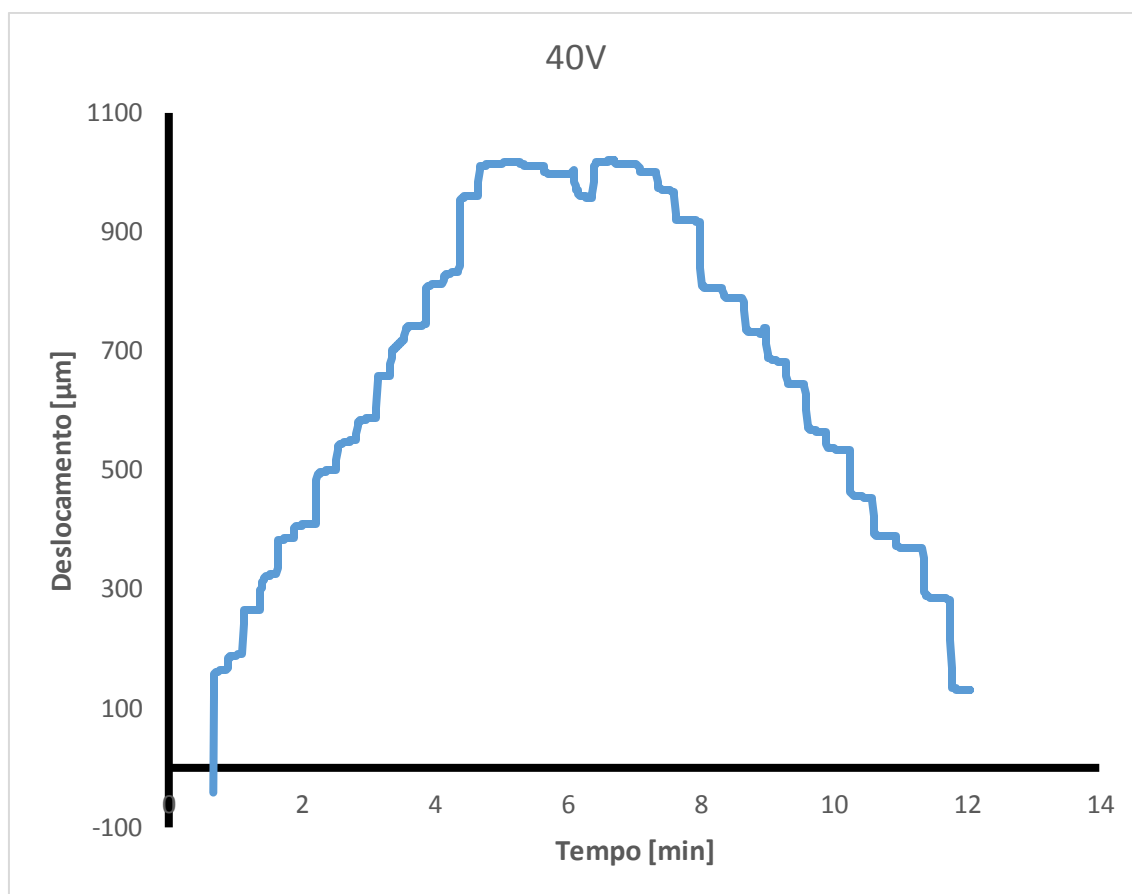


Figura 69 - Deslocamentos do bender 2 em função do tempo de medição utilizados para representar a curva de histerese correspondente a uma diferença de potencial máxima aplicada de 40V.



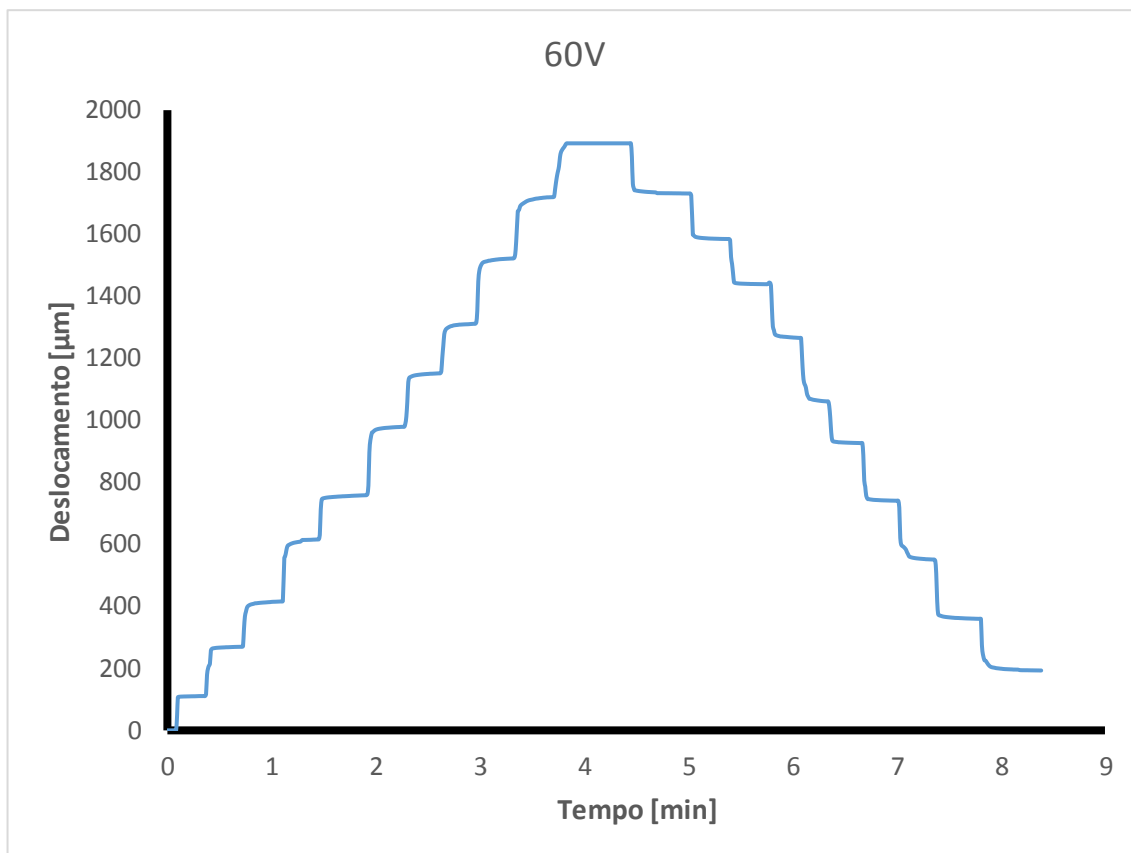


Figura 70 - Deslocamentos do bender 2 em função do tempo de medição utilizados para representar a curva de histerese correspondente a uma diferença de potencial máxima aplicada de 60V.

Para a obtenção destes resultados foi feito uma primeira ativação do bender bem a 10V e depois aumentou-se gradualmente a diferença de potencial até se atingir um valor máximo. Este aumento (a que corresponde cada um dos patamares) foi feito com diferentes intervalos. Na curva referente a 20V a diferença de potencial foi aumentada de 1 em 1 volt. Para uma diferença de potencial máxima de 40V o intervalo foi de 2 volt e para os 60V o aumento foi de 5 em 5 volts.